



**ANA MARGARIDA
CARVALHO DOS
REIS**

**Estabilização de misturas de resíduos para
aplicação florestal**



**ANA MARGARIDA
CARVALHO DOS
REIS**

**Estabilização de misturas de resíduos para
aplicação florestal**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Paula Duarte Gomes Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, e co-orientação do Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho ao meu marido, pelas horas “perdidas” a jogar nas minhas longas noites de escrita, e à minha irmã pelas palavras amigas e o apoio incondicional durante os seis meses que partilhou comigo o dia de trabalho.

o júri

presidente

Prof. Doutora Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela
professora Associada, Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Margarida Maria João de Quina
professora Auxiliar, Universidade de Coimbra

Prof. Doutora Ana Paula Duarte Gomes
professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho
professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

A todos os que fazem parte da minha vida, há muito ou pouco tempo...

Ao meu marido, pais, irmãos, tios, avó e primas.

Aos meus amigos que sempre estiveram do meu lado e disseram a palavra certa nos momentos mais difíceis.

Aos meus colegas de trabalho do RAIZ, especialmente ao Eng.º Luis Machado que acima de chefe sempre foi um Amigo. A ele agradeço por todo o apoio, amizade, paciência e acima de tudo, todo o conhecimento que transmitiu.

À minha orientadora, Professora Ana Paula Gomes, e ao co-orientador, Professor Luís Tarelho, por todo o apoio e disponibilidade dispensada.

palavras-chave

Compostagem, Indústria da Pasta e do Papel, Valorização de resíduos, Aplicação no solo

resumo

A elevada produção de resíduos na **Indústria da Pasta e do Papel**, a necessidade de reduzir a quantidade de resíduos encaminhados para aterro, a escolha da melhor tecnologia disponível para valorizar esses resíduos e os resultados obtidos em trabalhos anteriores na área da aplicação de resíduos em solos florestais e agrícolas foram os pontos chave para o desenvolvimento do presente trabalho. Portanto, o trabalho surgiu da necessidade de projetar a gestão de resíduos da Indústria da Pasta e do Papel através da produção de um composto, verificando as condições de homologação do composto produzido de acordo com a Portaria n.º 1322/2006, de 24 de Novembro.

A técnica de **valorização de resíduos** selecionada para o desenvolvimento do trabalho foi a **compostagem**, pois permite a estabilização dos resíduos biodegradáveis, reduzindo a concentração de compostos contaminantes existentes nos resíduos, reduz o volume de resíduos a transportar e a **aplicar no solo** e os custos destas duas operações.

O desenvolvimento do trabalho dividiu-se em duas fases: uma fase experimental sobre compostagem e uma fase de elaboração de uma proposta para a gestão de resíduos na Indústria da Pasta e do Papel. Na primeira fase testaram-se várias modalidades de pilhas de compostagem que se diferenciaram no tipo de agente de porosidade, casca ou resíduos da preparação de madeiras, da técnica de arejamento, passivo, mecânico ou sem arejamento, e cobertura, sem ou com manta geotêxtil. As pilhas de compostagem eram constituídas por uma mistura de resíduos com 30% de lamas primárias, 30% lamas biológicas, 25% de cinzas e 15% de casca ou resíduos da preparação de madeiras, em base tal qual. Ao longo do tempo o desenvolvimento do processo foi controlado, por uma monitorização periódica da temperatura, pH e humidade, e uma monitorização detalhada para analisar qual o estado de degradação das misturas de resíduos. A segunda fase do trabalho envolveu uma avaliação económica do processo de compostagem para as três unidades fabris do grupo, tendo sido necessário uma recolha dos quantitativos de resíduos produtivos, a produção de pasta e os custos de operação que foram considerados para o cálculo dos custos finais, mistura, transporte, espalhamento, incorporação e monitorização dos solos.

A principal conclusão das experiências realizadas na primeira fase do trabalho com as diferentes modalidades de pilhas de compostagem, é o facto de não existirem diferenças significativas entre elas. Portanto, a modalidade recomendada será aquela que apresenta os menores custos, pilha estática, sem cobertura e com resíduos da preparação de madeiras. Apenas deve ser tomado em consideração a necessidade de crivagem do agente de porosidade, a sua possível reutilização e a necessidade de cobertura em épocas de elevada pluviosidade. Em relação ao desenvolvimento do processo de compostagem, verificou-se que ao final de 35 dias de maturação foi possível obter misturas estabilizadas com boas características fertilizantes candidatas à homologação de acordo com a Portaria n.º 1322/2006, de 14 de Novembro.

Relativamente à segunda fase do trabalho, verificou-se que os quantitativos de resíduos produzidos são bastante diferentes entre as três unidades fabris do grupo PortucelSoporcel o que se reflete, posteriormente, nas quantidades de composto produzido, de resíduos escoados e na avaliação económica do processo quando aplicado em cada unidade fabril. Este processo permite um bom escoamento de resíduos para as três unidades fabris do grupo PortucelSoporcel. Em termos de custos operacionais, a aplicação do produto obtido por estabilização de mistura de resíduos permitirá uma redução de 157.000€/ano (5,0 €/tbtq) para a Unidade Fabril de Cacia, em 177.000€/ano (5,6 €/tbtq) no caso da Unidade Fabril da Figueira da Foz e em 355.000€/ano (4,8 €/tbtq) para a Unidade Fabril de Setúbal.

Considerando os custos de investimento em infraestruturas, eles têm um período de retorno entre 3 e 5 anos consoante seja considerado um Parque de Compostagem a descoberto ou com cobertura.

Como conclusão final o estudo efetuado indica que a opção de estabilização por compostagem dos resíduos da IPP, para posterior aplicação em solo florestal é viável e economicamente preferível à opção de aplicação desses resíduos em fresco.

keywords

Composting, Pulp and Paper Industry, Waste recovery, Soil application

abstract

The production of high amounts of waste in Pulp and Paper Industry, the need to reduce the amount of waste sent to landfill, the choice of the best available technology to add value to waste and enhance the results obtained in previous works in the area of application of waste on forestry and agriculture soils, were the key points for the development of this work. Therefore, the work came from the need to project waste management on the Pulp and Paper Industry by producing a compound and checking the approval conditions of the produced compost according to the legal document, *Portaria* 1322/2006 of November 24th.

Composting was the technique selected to develop this project, because it allows the stabilization of biodegradable waste, reducing the concentration of contaminant compounds existing in the waste, reduces the volume of waste to be transported and applied in the soil and the costs of these two operations.

The development of this work was divided into two phases: a phase of composting experience and another of preparation of the project for waste management on the Pulp and Paper Industry. In the first phase we tested various types of compost piles that differed in the type of porosity agent (bark or wood waste preparation), aeration technique (passive, with or without mechanical ventilation) and with or without geotextile cover. The composting piles consisted of a mixture of 30% of primary sludge, 30% of biological sludge, 25% of ashes and 15% of bark or waste from the wood preparation, wet basis. Over time, the development of the process was monitored by periodic temperature, pH and moisture monitoring, and a detailed monitoring to analyze the degradation of the mixed wastes. The second phase of the study involved an economic evaluation of the composting process for the three mills units of the group, being necessary to collect data of the quantitative waste production, pulp production and operating and investment costs that were considered for the calculation of the final costs, mixing, transporting, spreading, embedding and soil monitoring.

The main conclusion of the tests performed in the first phase of the work with different types of compost piles, is that there are no significant differences between them. Therefore, the recommended method is the one that has the lowest cost, static pile, no cover and waste of wood preparation. Should be appreciated the need for screening of the porosity agent, its possible reuse and the need of coverage during periods of high rainfall.

Regarding the development of the composting process, it was found that at the end of 35 days of aging was possible to obtain stabilized mixtures with good fertilizers characteristics, candidates for approval in accordance with to the legal document, *Portaria* 1322/2006 of November 24th.

For the second phase of the study, it was found that the quantity of the produced waste production were quite different between the three mills PortucelSoporcel group which is reflected on the amounts of produced compost, waste disposed and on the economic evaluation of the process when applied to each mill. This process allows a good outflow of waste to the three mills PortucelSoporcel group. In terms of operating costs, the application of the product obtained by the stabilization of mixed waste permit a reduction of about 157.000€/year (5,0€/tbtq) for Cacia mill, about 177.000€/year (5,6€/tbtq) in the case of the Figueira da Foz mill and about 355.000€/year (4,8 €/tbtq) for Setúbal mill.

Taking into account costs of infrastructure investment, they have a payback period of between 3 and 5 years, considering one Park composting uncovered or covered.

As a final conclusion, the performed study indicates that the stabilization option for subsequent application of PPI waste composting in forest soil is achievable and economically preferable to the option of applying these wastes in fresh.

Índice

ABREVIATURAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABELAS	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ENQUADRAMENTO	5
2.1. INDÚSTRIA DA PASTA E DO PAPEL	6
2.2. PROCESSO PRODUTIVO DE PASTA E PAPEL.....	7
2.2.1. TIPOS DE PASTA	8
2.2.2. PROCESSO PRODUTIVO DE UMA FÁBRICA INTEGRADA	9
2.3. RESÍDUOS DO PROCESSO	11
2.3.1. CASCA OU RESÍDUOS DA PREPARAÇÃO DE MADEIRA.....	12
2.3.2. CINZAS DA CALDEIRA A BIOMASSA	13
2.3.3. LAMAS	14
2.4. GESTÃO DE RESÍDUOS	17
2.5. COMPOSTAGEM	20
2.5.1. PROCESSO DE COMPOSTAGEM	21
2.5.2. SISTEMAS DE COMPOSTAGEM	24
2.5.3. QUALIDADE DO PRODUTO.....	25
2.5.4. COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA PASTA E DO PAPEL	25
2.6. ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO	26
3. CASO DE ESTUDO	29
3.1. METODOLOGIA	30
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.2.1. PROCESSO DE COMPOSTAGEM	30
3.2.1.6. MÉTODOS ANALÍTICOS.....	39
3.2.2. ELABORAÇÃO DO PROJETO DE GESTÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA PASTA E DO PAPEL	40
3.3. RESULTADOS	41
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO INICIAL DE RESÍDUOS E MISTURAS.....	41
3.3.2. EVOLUÇÃO DA COMPOSTAGEM.....	43
3.3.2.1. TEMPERATURA.....	43
3.3.2.2. HUMIDADE	50

3.3.2.3.	PH	54
3.3.2.4.	SUMÁRIO DOS RESULTADOS	55
3.3.3.	CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA PARA FINS DE HOMOLOGAÇÃO	56
3.3.3.1.	TEMPO ÓTIMO DE OPERAÇÃO	58
4.	PROJETO DE GESTÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA PASTA E DO PAPEL.....	64
4.1.	QUANTITATIVOS DE RESÍDUOS	64
4.2.	QUANTIDADE DE PRODUTO PRODUZIDO	66
4.3.	QUANTIDADE DE RESÍDUOS ESCOADOS	68
4.4.	AVALIAÇÃO DE CUSTOS.....	69
4.4.1.	DETERMINAÇÃO DA ÁREA NECESSÁRIA PARA A OPERAÇÃO DE COMPOSTAGEM	70
4.4.2.	CÁLCULO DOS CUSTOS NO TEMPO ÓTIMO DE OPERAÇÃO	73
4.5.	AVALIAÇÃO ECONÓMICA	77
4.5.1.	CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES FABRIS DO GPS	78
4.5.2.	DIMENSIONAMENTO DO PARQUE DE COMPOSTAGEM.....	79
4.5.3.	CUSTOS OPERACIONAIS	80
4.5.4.	AVALIAÇÃO DO INVESTIMENTO	82
5.	CONCLUSÕES	84
	BIBLIOGRAFIA	86
	ANEXO A – MÉTODOS ANALÍTICOS	I
	ANEXO B – PERDA DE MASSA.....	IX
	ANEXO C - ÁREAS DO PARQUE DE COMPOSTAGEM.....	X

ABREVIATURAS

AS	Aterro Sanitário
AOX	Compostos orgânicos halogenados
bs	base seca
btq	base tal qual
C_E_C	Mistura de lamas, cinza e casca, sem arejamento e com cobertura
C_M_C	Mistura de lamas, cinza e casca, com arejamento mecânico e com cobertura
C_P_C	Mistura de lamas, cinza e casca, com arejamento passivo e com cobertura
Cz	Cinzas
C:N	Razão entre a mássica de carbono e a massa de azoto
d	Dia
DL	Decreto-Lei
ECF	Elementar Chlorine Free
gPS	grupo PortucelSoporcel
IPP	Indústria da Pasta e do Papel
LB	Lamas Biológicas
LBr	Licor Branco
LN	Licor Negro
LP	Lamas Primárias
Lq	Limite de quantificação
LV	Licor verde
Mo	Matéria orgânica
MO	Microrganismos
MTD's	Melhores Tecnologias Disponíveis
MVG	Massa volúmica a granel
N _{total}	Azoto total
P _{total}	Fósforo total
PCI	Poder Calorífico Inferior
PE	Pegada Ecológica
RPM	Resíduos da preparação de madeiras
RPM_M	Mistura de lamas, cinza e resíduos da preparação de madeiras, com arejamento mecânico e sem cobertura
RPM_M_C	Mistura de lamas, cinza e resíduos da preparação de madeiras, com arejamento mecânico e com cobertura

RPM_P_C	Mistura de lamas, cinza e resíduos da preparação de madeiras, com arejamento passivo e com cobertura
t	Tonelada
tAD	Tonelada absolutamente seca
T CF	Total Chlorine Free
T_Ab	Temperatura da secção A na base
T_Ama	Temperatura da secção A a meia altura
T_b	Temperatura na base
T_Bb	Temperatura da secção B na base
T_Bma	Temperatura da secção B a meia altura
T_Cb	Temperatura da secção C na base
T_Cma	Temperatura da secção C a meia altura
T_ma	Temperatura a meia altura
V	Volume
VLE	Valor Limite de Emissão

NOMENCLATURA

A_{base}	Área da base da pilha	m^2
$A_{compostagem}$	Área da zona de compostagem	m^2
$A_{crivagem}$	Área da zona de crivagem	m^2
$A_{fert.}$	Área que o produto estabilizado permite fertilizar	ha/ano
$A_{fert.trad.}$	Área de fertilização tradicional – potencial de fertilização da mistura	ha/ano
$A_{fert.max.}$	Área de fertilização máxima que o produto permite fertilizar	ha/ano
A_{parque}	Área total do parque de compostagem	m^2
$A_{receção/mistura}$	Área da zona de receção e mistura dos resíduos	m^2
A_{Δ}	Área da secção da pilha	m^2
$C_{esp.}$	Custo de espalhamento	€/t btq
$C_{incorp.}$	Custo de incorporação	€/t btq
C_{inv}	Custo da disponibilização e preparação da área	€/m ²
$C_{mist.}$	Custo de mistura	€/t btq
$C_{transp.}$	Custo de transporte	€/t btq
Dist.	Distância	km
D_m	Massa específica da mistura em base tal e qual	t btq/m ³
$D_{Nrec.}$	Dose de azoto recomendável	60 kgN/ano
Esp.	Custo total de espalhamento	€/ha
f	Fator de perda de massa total	kg btq/ kg btq
Fert. trad.	Custo total de fertilização tradicional	€/ha
Incorp.	Custo total de incorporação	€/ha
l_{comp}	Comprimento total da zona de receção/mistura de resíduos	m
l_{larg}	Largura das futuras pilhas de compostagem	m
$l_{nec.}$	Largura necessária para a construção do nº total de pilhas	m
L_{pilha}	Comprimento total em pilhas de compostagem	m
Inv.	Custo total de investimento	€/ha
$M_{inicial}$	Massa de resíduos inicial	t btq/ano
Mist.	Custo total da preparação da mistura de resíduos	€/ha

Moi	Teor (massa/massa) de matéria orgânica inicial, bs	% bs
Mof	Teor (massa/massa) de matéria orgânica final, bs	% bs
Mo _{presente}	Teor (massa/massa) de matéria orgânica presente ao longo do processo, bs	% bs
M _{presente}	Massa total presente ao longo do processo	t btq/ano
M _{seca inicial}	Massa seca inicial	kg
M _{seca presente}	Massa seca presente em cada instante	kg
M _{seca prevista}	Massa seca prevista	kg
Nº pilhas	Número de pilhas necessárias	
n	Número total de pilhas	
P _{ms}	Perda de massa seca	kg/kg bs
P _{H2O}	Perda de massa de água	kgH ₂ O/kg bs
Q _{Ndisp.}	Massa de azoto disponível	kgN/ano
Q _R	Quantidade diária de resíduos disponível para compostagem	t btq/dia
r	Raio	m
R _{Hi}	Razão de humidade inicial	kgH ₂ O/kg bs
R _{Hf}	Razão de humidade final	kgH ₂ O/kg bs
R _{seco}	Rendimento seco, massa de composto seco por massa de mistura seca inicial	kgc _{seco} /kg bs
t	Tempo	dia
TH _{reais}	Teor de humidade	% btq
TH _{previsto}	Teor de humidade previsto	% btq
Transp.	Custo total de transporte	€/ha
V _{cone}	Volume do cone	m ³
V _{dm}	Volume diário da mistura de resíduos	m ³ /d
γ	Função matemática de <i>arredondamento por excesso preciso</i>	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tecnologias de eliminação/valorização dos resíduos produzidos na IPP.....	1
Figura 2 - Exemplos de percursos do papel.....	6
Figura 3 - Diagrama de um processo típico de uma fábrica de pasta Kraft.	11
Figura 4 - Produção de resíduos sólidos (CELPA, 2011)	12
Figura 5 - Área da preparação de madeiras, onde são produzidos a casca e o RPM.	13
Figura 6 – Área da central de energia, onde são produzidas as cinzas na caldeira a biomassa.	14
Figura 7 – Representação esquemática do tratamento de efluentes líquidos, ETAR, onde são produzidas as LP e as LB.	15
Figura 8 – Representação esquemática da lavagem da pasta, que está inserida na área da produção de pasta crua, onde são produzidos os rejeitos da crivagem como os <i>nós</i> e os <i>incozidos</i>	16
Figura 9 – Representação esquemática da Caustificação, que está inserida na recuperação de químicos e energia onde são produzidos os <i>dregs</i> e os <i>grits</i>	17
Figura 10 – Destino dos resíduos produzidos na IPP. (CELPA, 2011).	20
Figura 11 – Metodologia do trabalho.....	30
Figura 12 – Mistura de resíduos.	32
Figura 13 – Esquema das dimensões das pilhas construídas.....	34
Figura 14 - Fotografias de algumas pilhas construídas: a) construção de uma pilha com arejamento passivo, b) pilha de arejamento passivo coberta, c) pilha sem cobertura e com arejamento mecânico e d) pilha estática e com cobertura.....	35
Figura 15 – Esquema dos pontos de medição da	37
Figura 16 – Localização das unidades fabris pertencentes ao GPS.	40
Figura 17 - Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas com os diferentes agentes de porosidade, com arejamento passivo e cobertura (C_P_C e RPM_P_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).....	44
Figura 18 – Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas com os diferentes agentes de porosidade, com arejamento mecânico e cobertura (C_M_C e RPM_M_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).....	45
Figura 19 – Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas com diferentes tipos de arejamento, com casca e cobertura (C_P_C, C_E_C e	

C_M_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).....	47
Figura 20 - Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas com diferentes tipos de arejamento, com RPM e cobertura (RPM_P_C e RPM_M_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).....	48
Figura 21 – Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas sem ou com cobertura, com RPM e arejamento mecânico (RPM_M e RPM_M_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).....	50
Figura 22 – Evolução da humidade ao longo do tempo nas pilhas com diferentes tipos agente de porosidade (C_P_C, RPM_P_C, C_E_C, C_M_C, RPM_M e RPM_M_C). Os pontos representados são medições discretas da humidade, sendo que as linhas contínuas representam a sua evolução ao longo do processo.....	51
Figura 23 – Evolução da humidade ao longo do tempo nas pilhas com casca e diferentes tipos de arejamento (C_P_C, C_E_C e C_M_C). Os pontos representados são medições discretas da humidade, sendo que as linhas contínuas representam a sua evolução ao longo do processo.	52
Figura 24 – Evolução da humidade ao longo do tempo nas pilhas com RPM e diferentes tipos de arejamento (RPM_P_C e RPM_M_C). Os pontos representados são medições discretas da humidade, sendo que as linhas contínuas representam a sua evolução ao longo do processo.	53
Figura 25 – Evolução da humidade ao longo do tempo nas pilhas com RPM, sem e com cobertura (RPM_M e RPM_M_C). Os pontos representados são medições discretas da humidade, sendo que as linhas contínuas representam a sua evolução ao longo do processo.....	54
Figura 26 – Evolução do pH ao longo do tempo para as diferentes pilhas.....	54
Figura 27- Fotografias da pilha RPM_P_C no dia de arranque do processo (a), e da mesma pilha ao fim de 7 meses do início do processo de compostagem (b).	55
Figura 28 – Evolução das quantidades de matéria orgânica (a), teores de nutrientes: azoto total (b) e fósforo (c), razão C:N (d), AOX (e) e PCI (f) para a pilha RPM_P_C. Os pontos representados são medições discretas dos diversos parâmetros, sendo que as linhas contínuas representam somente ajustes matemáticos relativamente à variável independente x que representa o tempo de operação do processo.....	57

Figura 29 – Evolução da perda de água do processo de compostagem para as diferentes modalidades. Os pontos representados são medições discretas da perda de água, sendo que as linhas contínuas procuram descrever a evolução da perda de água ao longo do processo.	59
Figura 30 - Evolução da matéria seca no decorrer do processo de compostagem.	66
Figura 31 - Evolução do teor de humidade no decorrer do processo de compostagem. ..	67
Figura 32 - Dimensões das futuras pilhas de compostagem.	70
Figura 33- Evolução da área com o tempo para a unidade fabril de Cacia.	71
Figura 34 - Evolução da área com o tempo para a unidade fabril da Figueira da Foz.	72
Figura 35 - Evolução da área com o tempo para a unidade fabril de Setúbal.	73
Figura 36 – Potencial fertilizante da mistura de resíduos (Mistura inicial vs produto).	74
Figura 37 – Variação dos custos inerentes ao processo.	76
Figura 38 – Plantas do Parque de compostagem das unidades fabris do gPS, Portucel – Cacia (a), Soporcel – Figueira da Foz (b), Portucel – Setúbal (c), em que n representa o número de pilhas construídas ao fim de 35 dias.	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resíduos da IPP.	17
Tabela 2 – Melhor tecnologia disponível para cada tipo de resíduo da IPP.	18
Tabela 3 – Parâmetros caracterizados nos resíduos utilizados nos ensaios.	31
Tabela 4 – Caracterização individual dos resíduos e das misturas.	33
Tabela 5 – Composição das pilhas de compostagem em termos de mistura de resíduos, agente de porosidade, técnica de arejamento e cobertura.	35
Tabela 6 – Composição real das misturas de resíduos.	36
Tabela 7- Identificação das secções de monitorização da temperatura.	37
Tabela 8 - Parâmetros caracterizados na mistura de resíduos.	37
Tabela 9 - Parâmetros caracterizados no ponto considerado como ótimo.	38
Tabela 10 – Referência dos métodos analíticos utilizados para analisar os diversos parâmetros.	39
Tabela 11 – Valores de metais pesados nos resíduos e nas misturas de resíduos, e o VLE estipulados no <i>DL n.º 276/2009, de 2 de Outubro</i>	42
Tabela 12 – Valores de humidade, razão C:N e AOX nas misturas de resíduos.	42
Tabela 13 – Caracterização do material estabilizado para o tempo ótimo de operação, de acordo com diversos parâmetros, fertilizantes e ambientais.	60
Tabela 14 – Perda de matéria seca e de água.	61
Tabela 15 - Valores máximos admissíveis de metais pesados, para o DL nº 276/2009, relativo às lamas destinadas à aplicação no solo agrícola, e para as diferentes classes de composto do 2nd Draft (DG Env. A.2, 2001) e da Proposta de Norma Técnica (2005). ...	63
Tabela 16 – Quantitativos de resíduos.	64
Tabela 17 - Previsão de escoamento de resíduos da Portucel utilizando-se a compostagem dos mesmos.	68
Tabela 18 - Previsão de escoamento de resíduos da Soporcel utilizando-se a compostagem dos mesmos.	69
Tabela 19 - Previsão de escoamento de resíduos da Portucel Setúbal utilizando-se a compostagem dos mesmos.	69
Tabela 20 – Cálculo da área necessária para compostagem com o decorrer do processo.	71
Tabela 21 - Cálculo da área necessária para compostagem com o decorrer do processo.	72

Tabela 22 - Cálculo da área necessária para compostagem com o decorrer do processo.	72
Tabela 23 - Custos de operação considerados para o cálculo dos custos finais.	74
Tabela 24 – Necessidades de infraestruturação e equipamentos.	78
Tabela 25 – Veículos usados no transporte, mistura e construção das pilhas.	78
Tabela 26 - Redução de custos operacionais, da unidade fabril Portucel Cacia.	81
Tabela 27 - Redução de custos operacionais, da unidade fabril Soporcel.	81
Tabela 28 - Redução de custos operacionais, da unidade fabril Portucel Setúbal.	82
Tabela 29 – Período de retorno simples nas três unidades fabris do gPS.	83

1. INTRODUÇÃO

A Indústria da Pasta e do Papel (**IPP**) constitui uma atividade essencial no desempenho económico de Portugal, na medida em que se encontra bem integrada nos mercados nacionais e internacionais.

Nas suas diversas atividades (gestão florestal, produção de pasta e papel, produção de energia, etc.), a IPP, é responsável pela produção de uma grande quantidade de resíduos sólidos: orgânicos (lamas de ETAR), inorgânicos (cinzas, *dregs* e *grits*) e outros subprodutos (*nós*, incozidos) (CELPA, 2011). Ao longo do tempo, a IPP tem vindo a demonstrar cada vez mais uma preocupação e necessidade de valorizar os resíduos produzidos como recursos e não elimina-los apenas (Nurmesniemi *et al.*, 2007).

A **Figura 1** representa a evolução das tecnologias disponíveis para eliminação e/ou valorização dos resíduos da IPP. O grau de preocupação destas tecnologias com o ambiente aumenta com a aproximação à base da pirâmide.

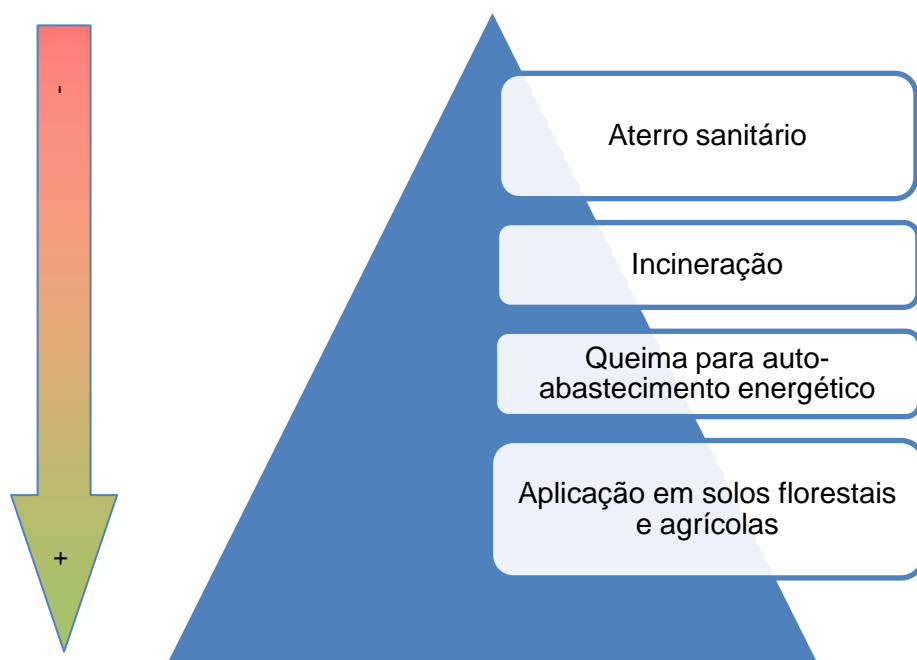


Figura 1 - Tecnologias de eliminação/valorização dos resíduos produzidos na IPP.

O Aterro sanitário (**AS**) é a técnica mais comum de deposição de resíduos (Reid, 1998; Stein *et al.*, 1998), apresentando diversas vantagens:

- Recebe uma grande variedade de resíduos;
- Gestão de fácil operação;

- Custo relativamente baixo comparativamente a outras técnicas;
- Permite que o espaço imobilizado até ao fim do seu tempo de vida útil seja aproveitado para outros fins, por exemplo na construção de áreas verdes ou parques;
- Evita a poluição e/ou contaminação ambiental, principalmente das águas superficiais e subterrâneas (Russo, 2003).

Mas também apresenta algumas desvantagens que não a tornam uma solução viável:

- Há um desperdício de matérias-primas, na medida em que este será o destino final dos resíduos;
- A capacidade de deposição é limitada;
- Há produção de lixiviados tóxicos;
- Ocorre produção de biogás, constituído maioritariamente por metano (**CH₄**) que agrava o efeito de estufa;
- Oposição pública para a construção de novos aterros nas imediações das suas casas (Rouleau & Sasseville, 1996).

A incineração é o segundo método mais utilizado para a eliminação de resíduos. A par do AS, também apresenta vantagens que induzem a escolha por esta técnica, como a:

- Redução do volume a depositar no AS, podendo chegar a 90%;
- Eliminação de resíduos tóxicos;
- Produção de energia sob a forma de calor ou vapor de água (Russo, 2003).

E desvantagens que também não permitem que esta técnica seja uma alternativa viável para alguns tipos de resíduos:

- Nem todos os resíduos são incineráveis, como são exemplo os resíduos industriais compostos por mercúrio (**Hg**), cádmio (**Cd**) ou chumbo (**Pb**);
- Há uma necessidade de um elevado custo de capital;
- Preocupações com a poluição atmosférica.

Na base da pirâmide encontra-se a aplicação em solos florestais e agrícolas que se tem tornado, a nível nacional e global, uma solução viável do ponto de vista ambiental e socioeconómico. Nesta área, diversos estudos têm sido desenvolvidos que demonstram resultados benéficos da aplicação destes resíduos no solo. Esses resultados refletem-se num maior rendimento de produção de culturas e na melhoria das propriedades do solo



(Henry *et al.*, 1993; Camberato *et al.*, 1997; Tripepi *et al.*, 1994). Os mesmos estudos, também demonstraram que é necessário ter atenção às razões C:N, níveis de metais pesados, presença de compostos tóxicos dos resíduos a serem incorporados no solo a par do conhecimento das propriedades e necessidades do próprio solo.

A IPP nas suas diversas atividades é responsável pela produção de uma grande variedade e quantidade de resíduos. Os resíduos produzidos podem ser divididos em dois grandes fluxos:

- Resíduos específicos do processo produtivo: rejeitos de madeira, rejeitos da crivagem, *dregs*, *grits*, cinzas, escória, areia e lamas da ETAR;
- Resíduos não específicos que se dividem em:
 - Resíduos não perigosos: papel, cartão, plásticos, vidros, etc.;
 - Resíduos perigosos: óleos usados, lâmpadas, hospitalares, etc.

Ao longo dos anos a par da evolução do processo produtivo, a quantidade de resíduos produzidos tem sofrido alteração. Atualmente, a preparação da madeira e o tratamento de efluentes são as atividades que apresentam as maiores produções de resíduos.

Devido às grandes quantidades produzidas de resíduos e à preocupação ambiental demonstrada pela IPP, as técnicas de separação e valorização dos mesmos, neste ramo industrial, têm sofrido alteração. Atualmente, a IPP, possui aterros controlados para a deposição segura dos resíduos e de mecanismos que permitem a separação dos resíduos por tipos e o tratamento, reciclagem, reutilização ou valorização de parte dos resíduos produzidos, reduzindo a necessidade da sua deposição nos aterros (CELPA, 2011).

A grande quantidade de resíduos produzidos no processo produtivo de pasta e papel, a necessidade de reduzir a quantidade de resíduos encaminhados para aterro, a seleção da melhor técnica para a valorização destes resíduos ou parte deles e os resultados obtidos em trabalhos anteriores na área da aplicação em solos florestais e agrícolas de resíduos foram o caminho para o “nascimento” do presente trabalho.

Neste contexto, este trabalho surgiu da necessidade de projetar a gestão de resíduos da IPP (fluxo de lamas da ETAR, cinzas (**Cz**) e resíduos da preparação de madeiras (**RPM**)) através da produção de um corretivo agrícola, verificando as condições de homologação



do respetivo corretivo produzido de acordo com a Portaria n.º 1322/2006 de 24 de Novembro.

Para que tais objetivos fossem possíveis de alcançar a técnica de valorização selecionada foi a compostagem, pois permite estabilizar os resíduos biodegradáveis, reduz a concentração de compostos contaminantes específicos existentes nalguns resíduos da IPP, e reduz o volume de resíduos a transportar e incorporar bem como os custos destas duas operações.

A compostagem permite a estabilização microbiológica da matéria orgânica presente nos resíduos. Neste contexto, quando a matéria orgânica atinge um grau avançado de decomposição, não evidenciando actividade microbiológica refere-se como matéria estabilizada (Wichuk & Mc Cartney, 2010).



2. ENQUADRAMENTO

Em meados do séc. XVIII, com a população em cerca de um décimo do que é atualmente, os recursos naturais estavam disponíveis em relativa abundância e eram pouco explorados. Foi nesta altura que despoletou a Revolução Industrial e com ela os hábitos de consumo das sociedades começaram a sofrer alterações. Alterações essas, crescentes, que continuaram até às sociedades modernas levando à escassez dos recursos naturais, poluição dos solos, água e ar, aquecimento global e perda de biodiversidade.

Com a evolução da indústria e preocupação com a necessidade de gerar dinheiro, muitos assuntos importantes foram esquecidos, como é o caso do impacto ambiental dessas mesmas indústrias sobre o planeta ou mesmo a ausência de condições de trabalho. No entanto, tanto a nível ambiental como humano, as prioridades destas preocupações têm-se alterado ao longo do tempo, por exemplo através da implementação de novas tecnologias amigas do ambiente e melhores condições de trabalho.

Existe um conceito mundial, a Pegada Ecológica (**PE**), que traduz a quantidade de recursos gastos por pessoa ou população para manter o seu nível de vida e de consumo. Apesar da população europeia corresponder a menos de 10% da população mundial, é a Europa que apresenta a maior PE. Para tal resultado, os cidadãos europeus consomem 50% da produção mundial de carne, 25% da produção mundial de papel e 15% da produção mundial de cerveja (Naturlink).

A nível empresarial, a PE, pretende determinar qual a área necessária para suportar o consumo empresarial de recursos naturais e sua produção de resíduos. Esta ferramenta permite avaliar o impacto da atividade sobre o planeta, quantificar e antever qual o sucesso e o fracasso das possíveis medidas adotadas para uma melhoria da eco-eficiência produtiva.

É com esta filosofia, PE Empresarial, que se tem vindo a deparar a IPP na medida em que este sector industrial tem sido responsabilizado por um grande consumo de recursos naturais, madeira, água, e energia, combustíveis fósseis e eletricidade (Thompson, *et al.*, 2001).

É neste âmbito, e tendo por base o conceito de sustentabilidade, que a IPP tem vindo a realizar grandes investimentos ao nível do processo de produção de pasta e papel, do

tratamento de efluentes gasosos e de efluentes líquidos. Tudo isto com a finalidade de melhorar o seu desempenho ambiental demonstrando, a todos, as suas crescentes preocupações com o planeta.

2.1. INDÚSTRIA DA PASTA E DO PAPEL

O papel não foi sempre como se conhece atualmente. O Homem ao longo dos tempos tem desenvolvido técnicas de guardar as suas recordações, **Figura 2**.



Figura 2 - Exemplos de precursores do papel.

A madeira como matéria-prima para a produção de papel, surgiu apenas em 1729 pela sugestão do francês Reamur, até então os trapos de linho e o algodão eram a principal matéria-prima do processo. Mas foi só em 1850 que surgiu a máquina para moer a madeira e transformá-la em fibras. Estas eram separadas e transformadas em “pasta mecânica” de celulose. E em 1854 foi descoberto em Inglaterra um processo de pasta celulósica com o tratamento de produtos químicos, surgindo então a primeira “pasta química”.

As primeiras espécies de árvores usadas na produção de papel à escala industrial foram o pinheiro, o abeto, o vidoeiro, a faia, o choupo preto e o eucalipto. A pasta derivada de eucalipto surgiu pela primeira vez à escala industrial no início dos anos 60, tendo sido uma “novidade” até à década de 70. No entanto, de todas as espécies de árvores usadas como matéria-prima do processo de fabricação de papel o eucalipto é aquela que apresenta um rápido ciclo de crescimento e por essa razão se tornou a principal matéria-prima (CELPA).



A IPP europeia estabelece um ciclo de produção sustentável a partir de um recurso renovável, a floresta, utilizando as melhores práticas silvícolas, fomentando a conservação da biodiversidade e rejeitando o corte ilegal de madeira. Desde 1910 a 2010, a floresta europeia cresceu cerca de 17 milhões de hectares (1,5 milhões de campos de futebol). O consumo de madeira, a nível mundial, tem várias utilizações além da produção de pasta e papel. Cerca de 90% da madeira consumida é utilizada na construção, no mobiliário e na produção de energia primária (utiliza mais de 50% do consumo total de madeira) (grupo PortucelSoporcel, 2011).

No nosso país, a produção de papel surgiu nos finais do Séc. XIV mas as primeiras fábricas apareceram no início do Séc. XVIII. Portugal foi o primeiro país a produzir pastas químicas de eucalipto ao sulfito em 1923 e ao sulfato em 1957 (CELPA).

Em Portugal, entre 2010 e 2011, a produção de papel e cartão aumentou em 7,1% em relação ao ano anterior. Este aumento deveu-se essencialmente ao aumento da produção de papel para usos gráficos e papéis sanitários e de uso doméstico. É nestas duas áreas que o nosso país tem vindo a ganhar mercado internacional, correspondendo 71% da produção total nacional à produção de papéis para uso gráfico (CELPA, 2011).

Estatisticamente Portugal a nível europeu é:

- O 4º maior produtor de pasta, 6,3% da produção total;
- O 3º maior produtor de pastas químicas, 9,2% da produção total deste tipo de pastas;
- O 11º maior produtor de papel e cartão, 2,2% da produção total;
- O 2º maior produtor de papel fino não revestido, 16,1% da produção deste tipo de papel (CELPA, 2011).

2.2. PROCESSO PRODUTIVO DE PASTA E PAPEL

Existem três tipos de fábricas do sector de produção de pasta e papel:

- i. Fábricas de pasta – apenas produzem pasta;
- ii. Fábricas de papel – produzem papel com a pasta oriunda de fábricas produtoras de pasta;
- iii. Fábricas integradas de pasta e papel – produzem pasta que posteriormente é transformada, na mesma unidade fabril, em papel.

2.2.1. TIPOS DE PASTA

A produção de pasta é um processo de dissolução da madeira em fibras individuais através de métodos químicos, semi-químicos ou mecânicos.

As pastas químicas que têm origem do tratamento químico da madeira originam produtos com elevada qualidade *standard* de impressão e escrita. Dentro destas pastas químicas, existem dois tipos de processo:

- i. **Processo ao sulfato ou processo Kraft** – origina uma pasta notavelmente mais forte. É um processo que utiliza diversos tipos de matéria-prima, sendo tolerante aos contaminantes presentes na madeira (EPA 2002). Inclui um sistema de recuperação de químicos e energia, tornando o processo mais económico e com menores preocupações ambientais, exceto no que respeita à presença de compostos com mau odor (IPPC, 2001). Este processo utiliza, no cozimento da madeira, uma base alcalina de sódio na solução de pasta (solução de sulfureto de sódio (Na_2S) e hidróxido de sódio (NaOH) solução designada por Licor Branco (**LBr**). É um processo menos drástico que o processo ao sulfito, uma vez que o Na_2S é mais seletivo na deslenhificação. Para o mesmo grau de dissolução, o tempo de cozimento e a perda de polissacarídeos são menores comparativamente com o processo ao sulfito. Mas é um processo que está associado à libertação de compostos de enxofre, os mercaptanos, que causam algumas preocupações ambientais (EPA 2002);
- ii. **Processo ao sulfito** – é um processo onde as pastas obtidas apresentam uma brancura elevada, permitindo que sejam utilizadas sem recorrer ao branqueamento. O processo de produção de pasta recorre a soluções ácidas de ácido sulfuroso (H_2SO_3) ião biossulfito (HSO_3^-) e uma base como reagentes para que seja possível atacar e solubilizar a lenhina. É um processo que acarreta problemas ambientais com um grau de resolução muito difícil, por exemplo, a regulação do pH dos condensados de evaporação (CELPA 2008).

As pastas semi-químicas são difíceis de branquear tornando-se amareladas quando expostas à luz solar. São utilizadas em miolo de cartão canelado por exemplo, onde a resistência, a rigidez e a coloração não são a principal preocupação. Na produção deste tipo de pastas, as temperaturas de cozimento são mais baixas, o licor de cozimento é mais diluído ou o tempo de cozedura é mais curto e a desintegração das fibras é feita mecanicamente (CELPA, 2008).

Por fim, a produção de pasta mecanicamente origina uma pasta mais fraca e de qualidade baixa, usada essencialmente em jornais e papéis de mercadoria. A separação das fibras é feita mecanicamente, não ocorrendo uma separação completa das fibras (CELPA, 2008).

2.2.2. PROCESSO PRODUTIVO DE UMA FÁBRICA INTEGRADA

O processo kraft é constituído por várias fases distintas, **Figura 3**, com início no parque de madeiras para a preparação das mesmas, o cozimento das aparas destroçadas ainda na primeira fase resultando na pasta crua. Posteriormente segue-se o branqueamento desta pasta e a sua transferência para a máquina de papel.

i. Preparação da madeira

A madeira que chega à unidade fabril é preparada para ser alimentada ao processo de fabrico. Esta preparação tem como objetivo o descasque dos toros, caso os mesmos cheguem à unidade fabril com casca, e o seu corte em aparas.

ii. Digestão e cozimento

O principal objetivo desta fase é o processamento da madeira para libertação das fibras através de processos químicos, que fragmentam e dissolvem a lenhina que agrega as fibras, ou mecânicos, que rompem a ligação entre as fibras por fricção.

Nesta fase, as aparas são introduzidas num digestor onde são impregnadas com LBr para permitir que a lenhina se liberte da celulose e se dissolva no LBr resultando no licor negro (**LN**). As aparas continuam o seu percurso ao longo do digestor enquanto o LN é extraído até se alcançar o nível de lenhina residual desejado. Sendo alcançado o conteúdo é descarregado, terminando aqui um ciclo de cozimento (IPCC, 2001). Os produtos descarregados são as fibras de madeira separadas, a pasta crua que segue para a lavagem e crivagem, e o LN que contém sólidos dissolvidos da lenhina numa solução de produtos químicos e é encaminhado para a área da recuperação de químicos e energia. Na área da recuperação de químicos é possível recuperar o LBr utilizado no cozimento.

iii. Lavagem e crivagem da pasta

Esta fase do processo permite:

- Remover as impurezas da suspensão de pasta pois estão associadas a problemas relacionados com a qualidade, consumo de químicos e redução da eficiência;
- Proteger os equipamentos a jusante;
- Concentrar as impurezas no caudal rejeitado com a menor perda possível de fibra, químicos e sólidos.

A lavagem reduz a quantidade de compostos inorgânicos e substâncias orgânicas existentes na pasta que poderão formar compostos organoclorados (Suntio *et al.*, 1988). A crivagem faz a desintegração das aparas em fibras, ocorrendo de seguida a remoção dos nós, incozidos e impurezas (IPCC, 2001).

iv. Branqueamento da pasta

O branqueamento permite:

- A deslenhificação final da pasta crua;
- Aumentar o grau de brancura da pasta;
- Limpar a pasta de *shives* (fibras não branqueadas), impurezas, resinas e iões metálicos.

O branqueamento é um processo que ocorre por estágios de oxidação ácida e extração alcalina. Estes estágios de branqueamento têm sofrido melhorias ao longo dos tempos ao nível ambiental e de qualidade:

- Cloro elementar (**Cl**): processo que usa o cloro molecular ou o cloro gasoso com outros químicos que contêm cloro, como é o caso do hipoclorito.
- Elemental Chlorine Free (**ECF**): neste processo o Cl_2 é substituído por dióxido de cloro (**ClO_2**);
- Total Chlorine Free (**TCF**): neste processo os químicos utilizados não contêm Cl_2 , podendo ser o oxigénio (**O_2**), o peróxido de hidrogénio (**H_2O_2**) ou o ozono (**O_3**).

v. Produção de papel

No caso de fábricas integradas, a pasta armazenada num tanque depois de refinada é encaminhada para a máquina de papel onde são adicionados diversos produtos químicos com diferentes finalidades. Um desses produtos químicos é o carbonato de cálcio

(CaCO_3) utilizado para preencher os espaços vazios entre as fibras permitindo uma aparência mais compacta e homogênea ao papel.

A pasta segue numa tela, a primeira parte da máquina de papel, como uma suspensão aquosa de fibras de celulose, onde a água é drenada ficando apenas as fibras que serão transformadas numa folha de papel. Posteriormente segue para as prensas onde a espessura é reduzida, produzindo uma superfície lisa. Antes da secagem da folha são aplicados revestimentos que melhoram o brilho e a cor do papel. O processo de produção de papel termina num enrolador, formando um rolo de cerca de 40 toneladas (t), o “jumbo”, que é transportado para uma máquina que o corta e volta a enrolar em rolos mais pequenos, as bobines (EPA, 2002).

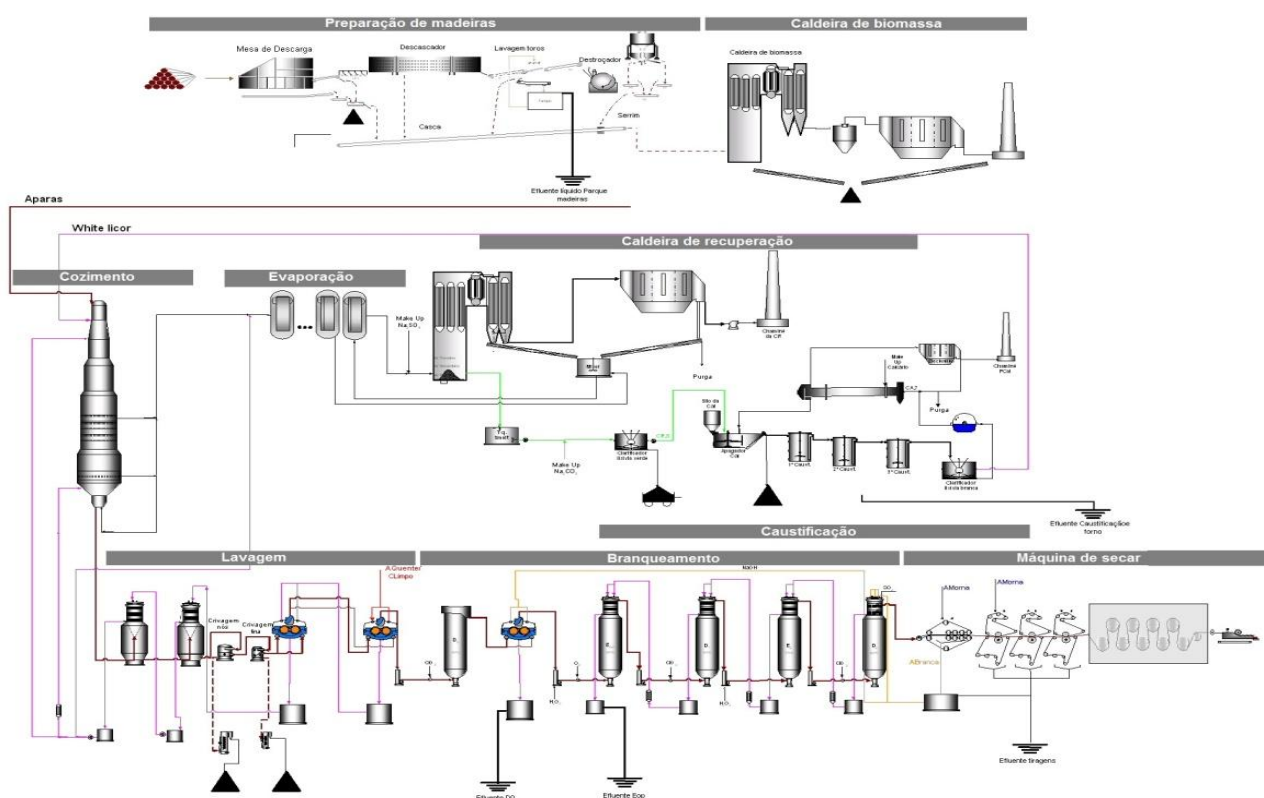


Figura 3 - Diagrama de um processo típico de uma fábrica de pasta Kraft.

2.3. RESÍDUOS DO PROCESSO

Entende-se por resíduos do processo como o excesso que ocorre no processamento da madeira e que não é incorporado no produto final. Este excesso pode ter origem sólida, líquida ou gasosa, representando uma grande preocupação ambiental. Neste trabalho

salienta-se a importância da valorização dos resíduos sólidos em detrimento dos líquidos e gasosos para a IPP, uma vez que os primeiros podem ser valorizados e os demais não.

A **Figura 4** representa os quantitativos gerados na IPP em Portugal, entre 2010 e 2011:

- Nos primeiros quatro anos do estudo são as lamas da ETAR o resíduo que mais contribui para o valor final produzido, com valores entre os 40% e os 65%;
- A categoria de outros resíduos sólidos tem algum peso no ano de 2002, correspondendo a aproximadamente a 30% do total de resíduos produzidos;
- De 2005 adiante é a madeira e o descasque que tem maior peso na produção final de resíduos, 45-70%, sempre acompanhado da produção de lamas da ETAR, 25-45%;
- A produção de cinzas, escória, poeiras e outros resíduos de caldeiras tem pouco peso na totalidade de resíduos produzidos anualmente, 3-8%.

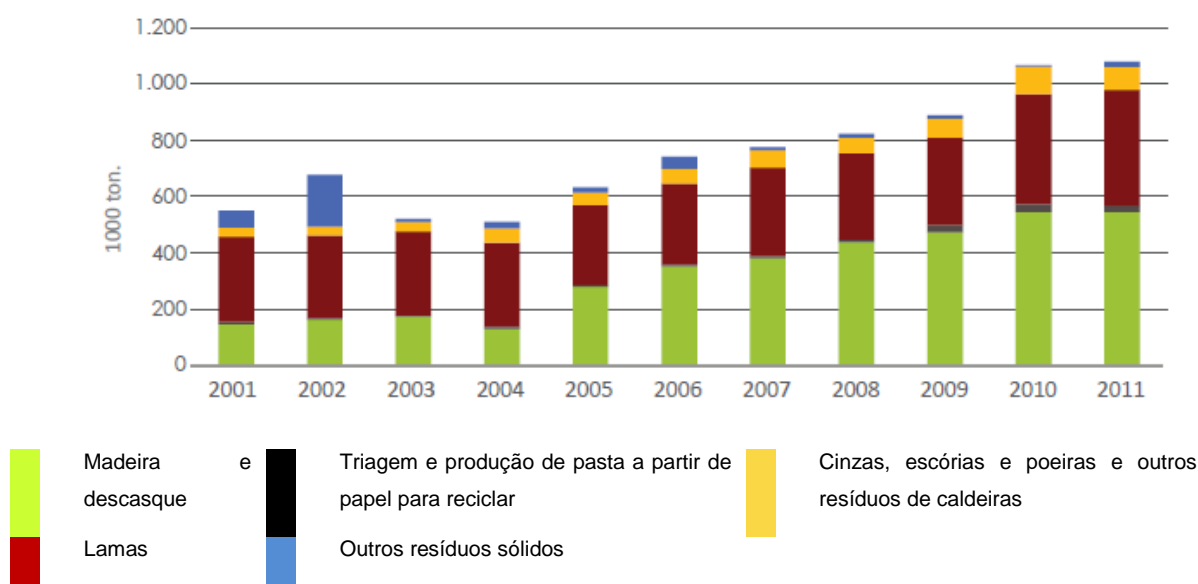


Figura 4 - Produção de resíduos sólidos (CELPA, 2011)

2.3.1. CASCA OU RESÍDUOS DA PREPARAÇÃO DE MADEIRA

A casca e os RPM são resíduos da primeira etapa do processo de produção de pasta, a preparação da madeira, **Figura 5**. Ao parque de madeira chegam toros de madeira, com ou sem casca, onde sofrem um descasque para posteriormente serem destroçados e crivados. É daqui que se obtém a casca, os finos, utilizada na caldeira de biomassa, e os

resíduos da preparação de madeiras, os grossos, (toros, casca, folhas, etc.) que caíram das passadeiras e camiões, e que não são aproveitados.

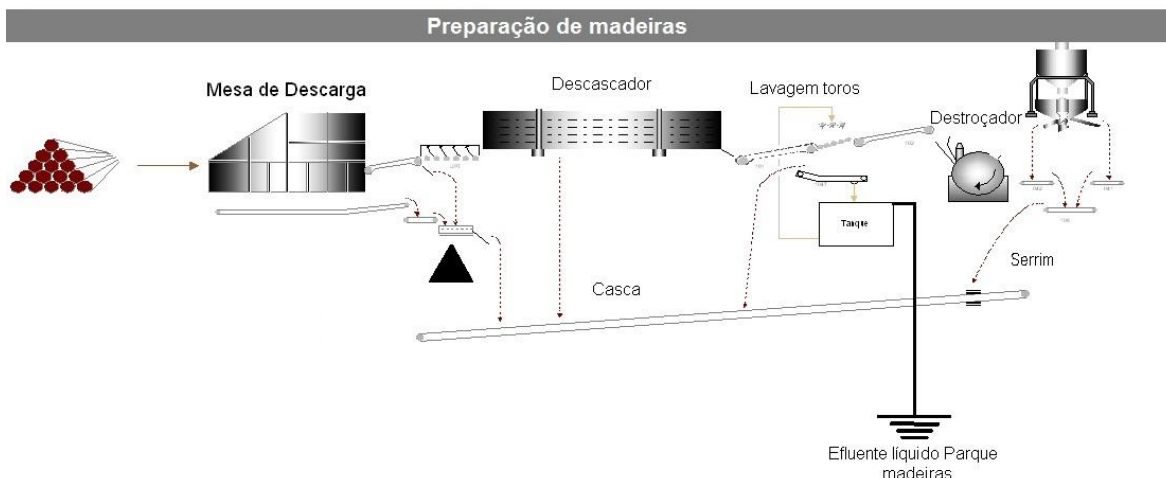


Figura 5 - Área da preparação de madeiras, onde são produzidos a casca e o RPM.

2.3.2. CINZAS DA CALDEIRA A BIOMASSA

Resultam essencialmente da combustão de casca e finos aproveitados para conversão de produção de energia na caldeira auxiliar, **Figura 6**. São resíduos alcalinos e inorgânicos, resultantes da combustão da casca de eucalipto. O teor seco é praticamente 100% sendo por vezes adicionada água para facilitar o seu manuseamento.

Do ponto de vista de fertilização, este resíduo apresenta um elevado teor de cálcio o que, dependendo do tipo de solo, constitui uma importante vantagem. Este resíduo permite fechar o ciclo da componente inorgânica entre a floresta e a fábrica, uma vez que as cinzas geradas correspondem a uma parte da componente inorgânica retirada do solo durante o crescimento das plantas.

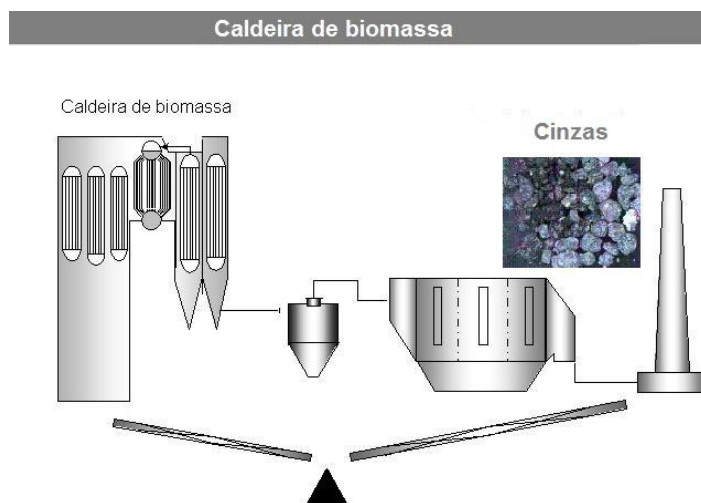


Figura 6 – Área da central de energia, onde são produzidas as cinzas na caldeira a biomassa.

2.3.3. LAMAS

A IPP, no tratamento de efluentes, **Figura 7**, produz dois tipos de lamas: as lamas primárias (**LP**) e as lamas biológicas (**LB**).

As LP resultam da separação dos sólidos suspensos que chegam com o efluente bruto à estação de tratamento. São constituídas principalmente por fibra, sólidos orgânicos precipitados e sólidos inorgânicos como CaCO_3 , refletindo deste modo as características da madeira e dos reagentes usados durante a produção de pasta e papel. Do ponto de vista de fertilização, apresentam um teor elevado de matéria orgânica essencialmente de natureza lenhino-celulósica, o que faz com que a sua relação C:N seja alta.

Por sua vez, as LB são essencialmente constituídas por matéria orgânica, excesso de microrganismos (**MO**) do tratamento biológico, separada nos decantadores secundários. Estas lamas são espessadas e prensadas em equipamentos próprios podendo serem processadas conjuntamente com as lamas primárias devido à dificuldade de desidratação. Do ponto de vista de fertilização, são um material muito interessante uma vez que apresentam elevados níveis de azoto (**N**) e doses satisfatórias de fósforo (**P**), para além de abundante conteúdo em matéria orgânica.

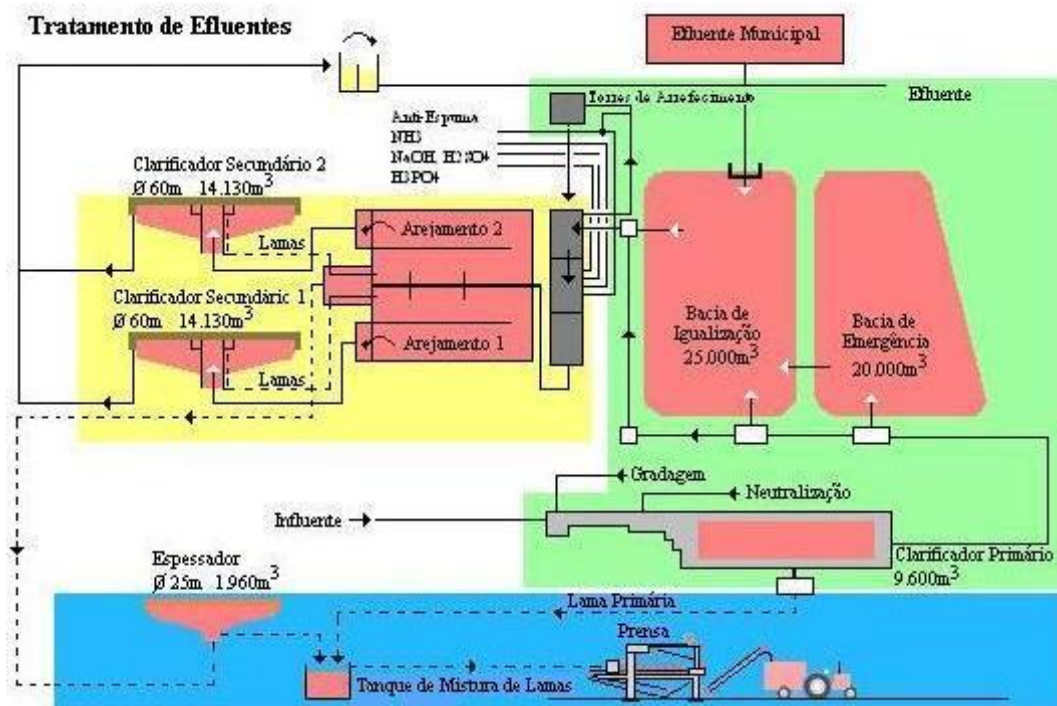


Figura 7 – Representação esquemática do tratamento de efluentes líquidos, ETAR, onde são produzidas as LP e as LB.

2.3.4. OUTROS

2.3.4.1. REJEITOS DA CRIVAGEM

Exemplos de rejeitos da crivagem são agregados de fibras de maiores ou menores dimensões, *nós* e aparas de madeira incozida por sobre espessura, **Figura 8**.

O nome *nós* está associado aos nós da madeira que são de difícil cozimento, tornando-os um rejeito do processo uma vez que as suas dimensões não permitem que o LBr seja completamente impregnado. Além destes, as aparas também não são completamente impregnadas pelo LBr, o que não permite uma completa deslenhificação. A não completa impregnação leva a que as fibras não se separem e por isso têm de ser retirados do processo.

Estes resíduos podem também ser designados por *incozidos* pois são resíduos resultantes do cozimento, são pedaços de madeira que não sofreram um cozimento completo.

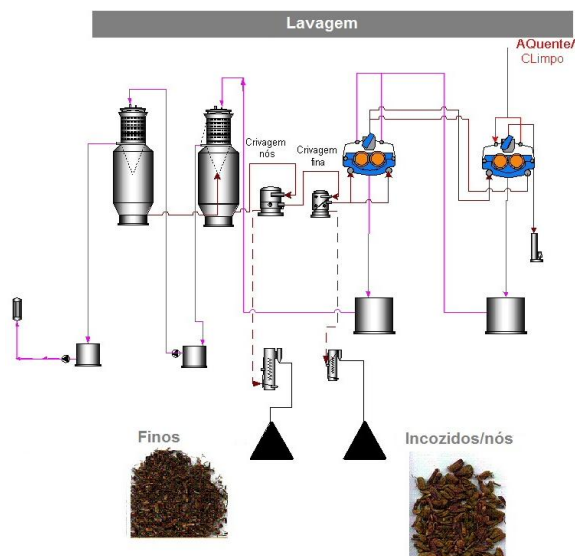


Figura 8 – Representação esquemática da lavagem da pasta, que está inserida na área da produção de pasta crua, onde são produzidos os rejeitos da crivagem como os *nós* e os *incozidos*.

2.3.4.2. DREGS E GRITS

Os *dregs* e os *grits* são resíduos resultantes dos lavadores de lamas e do apagador de cal da área da Caustificação que se insere na área da Recuperação de químicos e energia, juntamente com a Evaporação e a Caldeira de recuperação, **Figura 9**.

Os *dregs* são as impurezas sólidas do Licor verde (**LV**) resultante da caldeira de recuperação. São constituídos por CaCO_3 e sódio (**Na**), carvão da combustão incompleta da Caldeira de Recuperação, sílica, sulfuretos de metais e outros sais provenientes da Caldeira. Estes resíduos são bastante prejudiciais para a eficiência do processo, sendo que o primeiro passo compreende a sua separação do LV, por sedimentação num clarificador.

Os *grits* por sua vez são as impurezas de cal do apagador de cal, podendo ser areias, calcário, escórias e inertes. São retirados do fundo do apagador, encaminhados por um classificador de resíduos e lavados minimizando as perdas de Na, antes de serem descarregados para o exterior.

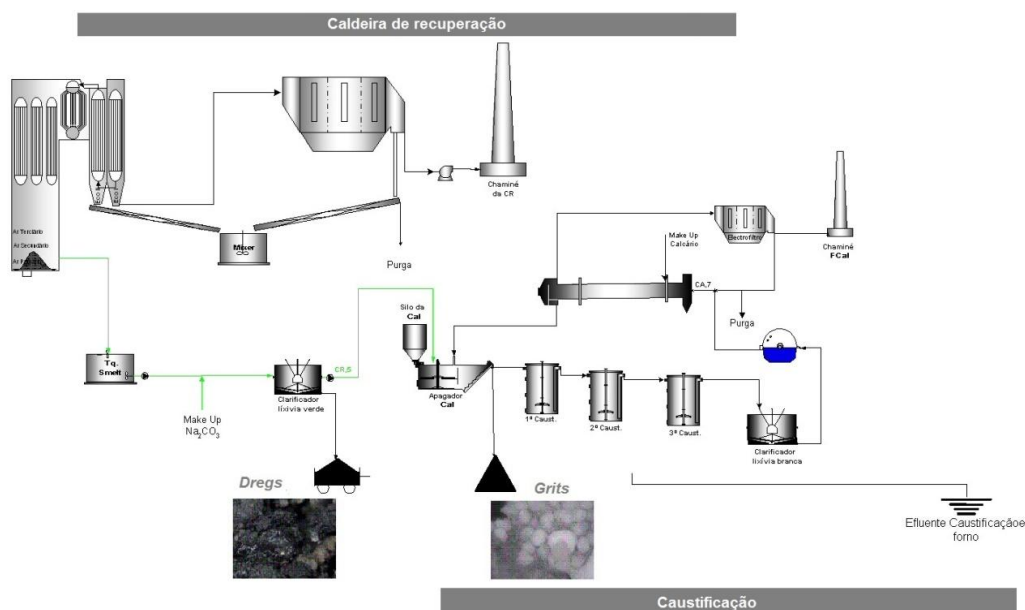


Figura 9 – Representação esquemática da Caustificação, que está inserida na recuperação de químicos e energia onde são produzidos os *dregs* e os *grits*.

2.4. GESTÃO DE RESÍDUOS

Não é de mais relembrar que os resíduos da IPP podem ser divididos em dois grandes fluxos, **Tabela 1**.

Tabela 1 - Resíduos da IPP.

Fluxo de resíduos da IPP		
Resíduos específicos	Resíduos não específicos	
<ul style="list-style-type: none"> - Rejeitos de madeira - Rejeitos da crivagem - Dregs, grits - Cinzas, escória, areia - Lamas da ETAR 	Não perigosos:	Perigosos:
	<ul style="list-style-type: none"> - Papel, cartão - Plásticos - Vidros - etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Óleos usados - Lâmpadas - Hospitalares - etc.

A estratégia de gestão do fluxo de resíduos da IPP passa pela seleção das Melhores Tecnologias Disponíveis (**MTD's**):

- **Prevenção:**
 - Redução da produção e/ou perigosidade dos resíduos;
 - Reutilização;
- **Valorização**
 - Reciclagem;
 - Orgânica;
 - Energética;

- **Incineração** com recuperação energética;
- **Confinamento** em aterro.

Todas as MTD's devem ter como finalidade/objetivo:

- A minimização da produção de resíduos e recorrer à recuperação, reciclagem e reutilização sempre que tal seja possível;
- A recolha seletiva e armazenagem intermédia garantindo o seu correto manuseamento e encaminhamento;
- A incineração de todo o material orgânico não perigoso numa caldeira auxiliar concebida para esse propósito, a queima de combustíveis de elevado teor de humidade e baixo poder calorífico;
- E a utilização externa de resíduos substituintes na floresta, agricultura ou outras indústrias.

Na IPP kraft as MTD's são:

- Descasque da madeira a seco;
- Aumento da deslenhificação a montante da unidade de branqueamento;
- Lavagem de elevada eficácia e crivagem em ciclo fechado da madeira não branqueada;
- Branqueamento ECF com baixos níveis de AOX ou TCF;
- Reciclagem de alguma água do branqueamento;
- Sistema eficaz de monitorização, contenção e recuperação de derrames;
- Remoção e reutilização dos condensados da unidade de evaporação;
- Entre outras (IPPC, 2001).

Dos resíduos descritos na **Tabela 1** e das MTD's existentes para esta área é possível fazer a associação descrita na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Melhor tecnologia disponível para cada tipo de resíduo da IPP.

Resíduos	MTD's
LP, LB, RPM	Produção de energia
LP, LB, cinza, grits, dregs, areia	Agricultura, floresta, materiais de construção
Nós, rejeitos da crivagem, LP	Reutilização da fibra

Vários estudos têm sido realizados sobre as técnicas mais viáveis a nível ambiental e socioeconómico. Estudos esses que priorizaram a reciclagem dos resíduos face à incineração e deposição em AS (Brisson, 1997). Estas duas técnicas de eliminação foram aceites no passado mas não devem continuar a ser opção de eliminação no futuro.

A aplicação no solo permite que os resíduos produzidos na IPP e que teriam como destino final o AS ou a incineração, sejam utilizados para benefício do solo tirando partido das suas propriedades.

A aplicação de resíduos no solo pode acontecer sem ou com a estabilização da matéria orgânica presente nos resíduos. A estabilização pode acontecer por duas técnicas distintas:

- Digestão anaeróbia, onde ocorrem reações que, na ausência de O_2 , convertem a Mo em biogás (CH_4 e CO_2 que pode ser usado para produzir eletricidade) e composto;
- Compostagem, que não é mais do que um processo de reciclagem da matéria fermentável originando uma substância húmica, o composto, que pode ser usado no fabrico de adubos, como corretivo nos solos, proteção e recuperação de solos.

A aplicação de resíduos estabilizados em relação à aplicação de resíduos frescos (sem estabilização), permite:

- A redução da carga poluente dos resíduos a aplicar no solo;
- Reduz o volume, a massa e a água dos resíduos reduzindo indiretamente os custos associados à preparação, transporte, espalhamento e monitorização da aplicação no solo;
- Elimina as substâncias tóxicas, os germes e as sementes presentes nos resíduos;
- Elimina maus odores.

Na **Figura 10** encontra-se uma análise temporal do destino dos resíduos produzidos na IPP em Portugal:

- A aplicação de lamas e cinzas da queima de biomassa na agricultura e compostagem em cerca de 14% do total de resíduos produzidos;
- A valorização por outras indústrias em cerca de 11% do total de resíduos produzidos;
- A valorização energética em cerca de 53% do total de resíduos produzidos;

- A deposição em aterro ainda representou cerca de 12% do total de resíduos produzidos.

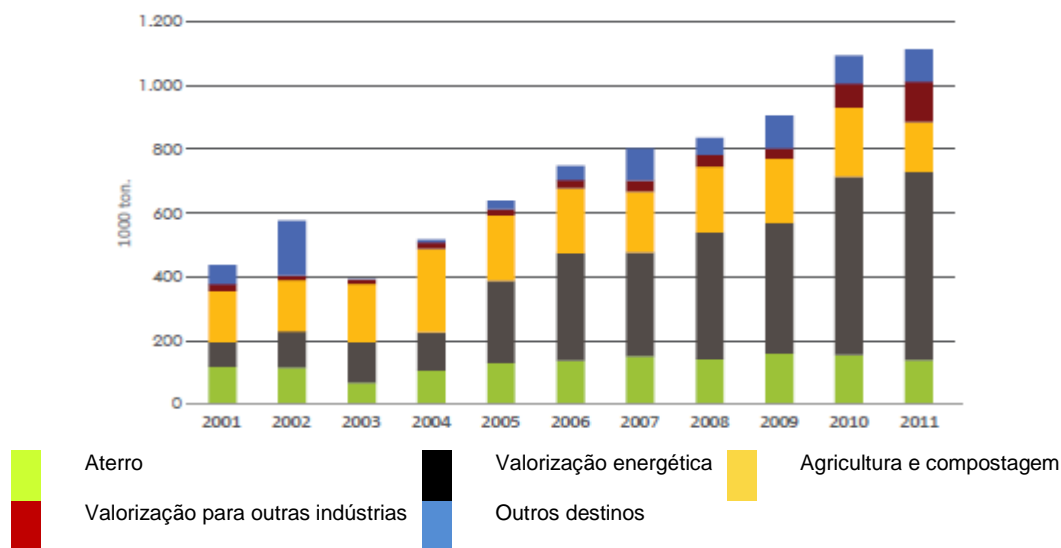


Figura 10 – Destino dos resíduos produzidos na IPP. (CELPA, 2011).

2.5. COMPOSTAGEM

A necessidade de preparar o solo para produção fez com que dejetos animais e resíduos vegetais fossem incorporados no solo de modo a equilibrar as quantidades de nutrientes nele presentes (Avnimelech, 1986).

A compostagem não é uma prática moderna, há registos do uso desta técnica na China há mais de 2000 anos. Durante os séculos XVIII e XIX, na Europa os agricultores trocavam os seus produtos pelos resíduos sólidos urbanos, que eram utilizados como corretivos orgânicos do solo. Entende-se por compostagem como a degradação biológica aeróbia controlada de resíduos orgânicos até se alcançar a sua estabilização. Zucconi & Bertoldi, 1987, e Brito, 2005, definem compostagem como um processo de oxidação biológica onde os MO decompõem os materiais produzindo dióxido de carbono, vapor de água e energia sobre a forma de calor.

Nas últimas décadas várias definições de compostagem foram surgindo; Haug, 1980 define, “processo aeróbio de decomposição que produz calor que é conservado na massa de acordo com fatores físicos tais como a capacidade calorífica, radiação e convecção.”

A compostagem é uma técnica de valorização de resíduos que permite o desenvolvimento de MO decompositores. Através do controle das condições ambientais e

nutricionais que se vão alterando ao longo do processo de decomposição, é possível a sua otimização, com o objetivo de assegurar os seguintes resultados:

- estabilização da matéria orgânica;
- neutralização de agentes patogénicos;
- eliminação de substâncias fito tóxicas;
- eliminação de germes e sementes;
- eliminação de odores desagradáveis;
- produção de um corretivo orgânico de fácil manuseamento - composto;
- reciclagem de nutrientes dos resíduos orgânicos necessários para o solo;
- redução do volume, da massa e do teor de humidade dos resíduos (Bertoli *et al.* 1982).

É um processo de valorização de resíduos e como outro qualquer apresenta vantagens e desvantagens:

- Em termos de vantagens permite:
 - Uma decomposição e oxidação da matéria orgânica, tornando-a estável;
 - Higienização do material;
 - Necessita de pouca quantidade de energia externa para o seu funcionamento (Pereira Neto, 1987);
 - Produção de fertilizantes naturais que não contaminam as águas;
 - Processo pouco dispendioso considerando os ganhos ambientais;
 - Redução da quantidade de resíduos a depositar em AS.
- Em termos de desvantagens verifica-se a necessidade de uma área grande disponível para o desenvolvimento do processo e a necessidade de utilização de mão-de-obra (Russo, 2003).

2.5.1. PROCESSO DE COMPOSTAGEM

O processo de compostagem tem início na escolha dos materiais, na seleção do local e na definição da tecnologia do sistema de compostagem. A reação de decomposição ocorre na presença de, carbono orgânico biodegradável, água, oxigénio e nutrientes.

Os materiais utilizados podem ser divididos em duas classes:

- materiais ricos em carbono (**C**) (fonte de energia), são os materiais lenhosos como são a casca de árvores, aparas de madeira, serrim, podas de jardim, folhas, palhas, feno, papel, etc.;



- materiais ricos em N (fonte energia e macronutrientes) como as folhas verdes, estrumes de animais, solo, restos de vegetais hortícolas, erva, etc.

Há transformação da mistura de resíduos em matéria orgânica estável química e biologicamente através da atividade dos MO na presença de oxigénio e humidade (Paré *et al.*, 1998) que na sua atividade obtêm energia e nutrientes necessários ao seu crescimento e reprodução. Nem toda a energia produzida é utilizada pelos MO, sendo esta libertada sob a forma de calor juntamente com o dióxido de carbono (CO_2), água e subprodutos gasosos (Gray *et al.*, 1971; Day & Shaw, 2005).

A duração do processo de compostagem varia com a composição dos resíduos a compostar, com a tecnologia utilizada e com diversos fatores ambientais e operacionais:

- I. O **arejamento**, que idealmente deve ser constante para que as atividades metabólicas dos MO e a degradação ocorra de forma rápida. O CO_2 aumenta gradualmente enquanto o O_2 vai diminuindo. No interior da mistura de resíduos a concentração de CO_2 mais O_2 é de cerca de 20%, 15-20% de O_2 e 0,5-5% de CO_2 (MacGregor, 1981). Concentrações de O_2 inferiores levam à formação de gases com odor desagradável, devido ao aparecimento dos MO anaeróbios. Para que tal não aconteça, o espaço intersticial entre os resíduos deve ser mantido, permitindo que o ar circule através da porosidade do material. Também é necessário realizar revolvimentos ou forçar a entrada de ar por insuflação ou sucção. Estes revolvimentos permitem misturar, homogeneizar, desgastar e reduzir a granulometria dos resíduos e redistribuir os organismos, a água e os nutrientes;
- II. A **temperatura** permite avaliar o bom ou mau desenvolvimento do processo, uma vez que a produção de calor de um material é indicativa da sua atividade biológica. O processo de compostagem pode ser dividido em duas partes:
 - a. A primeira é mais ativa, havendo uma grande atividade metabólica e um aumento da temperatura. Inclui as seguintes fases:
 - i. Mesofílica, que ocorre nas primeiras 24-48h, pois existe abundância de substratos que levam a uma grande atividade microbiológica. Nesta a temperatura aumenta rapidamente, até 40-50°C, e o pH diminui. Nesta fase acontece a decomposição, por parte das bactérias mesófilas, das substâncias de degradação mais fácil, como é o caso dos hidratos de carbono, lípidos e proteínas (Day & Shaw, 2005);



- ii. Termofílica, onde ocorre uma produção abundante de energia calorífica metabólica, pela atividade dos MO, o que proporciona um aumento de temperatura acima dos 60°C. É aqui que acontece a higienização do material, pela degradação dos açúcares, gorduras, amido e proteínas, pela ação das bactérias termófilas, actinomicetes e fungos. O pH sobe e é uma fase que pode durar apenas dias, ou algumas semanas, ou vários meses, sendo o final identificado pela diminuição da temperatura;
 - b. A segunda parte é a fase de arrefecimento, ocorrendo uma redução da atividade metabólica e onde o material se torna estável, escuro, amorfo, com aspeto de húmus e cheiro a terra (Witter & Lopez-Real, 1987). Volta a uma fase inicial, com uma diminuição da temperatura devido à decrescente atividade dos MO pela redução das fontes nutritivas e o pH torna-se ligeiramente alcalino (Zucconi & Bertoldi, 1987). Consiste na fase de maturação do material degradado, com a formação de compostos húmicos.
- III. O **teor de humidade** que traduz a necessidade de água no processo para o seu bom desenvolvimento. Inicialmente o teor de humidade não deverá ser superior a 50-55%, uma vez que impede a difusão do O₂ entrando o sistema em anaerobiose, libertando-se substâncias tóxicas e ocorrendo perda de nutrientes por lixiviação, nem inferior a 40% pois níveis reduzidos de água afetam a atividade de alguns MO podendo em muitos casos cessar essa mesma atividade (valores de 8-12%);
- IV. A **razão C:N**, uma vez que o C e o N estão presentes nas células microbianas, cerca de 50% de C e 2-8% de N. A razão C:N depende dos MO e do meio de crescimento, 2/3 do C perde-se como CO₂ e 1/3 combina-se com o N nas reações celulares (Russo, 2003). Para o arranque do processo de compostagem é aconselhável uma razão entre 25 e 35, uma vez que uma razão inferior a 20 faz com que o C seja completamente utilizado sem que ocorra a completa utilização do N e caso seja superior a 30 há um crescimento lento dos MO devido à ausência de N, levando a uma menor degradação do C e a um aumento lento da temperatura (Brito, 2005).
- V. A **granulometria** do material, que vai diminuindo ao longo do processo devido à atividade dos MO (Raviv *et al.*, 1987). O ideal é um material muito fraccionado que

permite ter uma maior área superficial sujeita ao ataque dos MO, diminuindo o tempo de compostagem;

- VI. Outros aspetos não menos importantes e que devem ser monitorizados ao longo do processo:
- a. O **pH** – durante o processo de compostagem observa-se um fenómeno de “autorregulação” do pH realizado pelos MO (Pereira Neto, 1992). O pH de uma mistura de resíduos não pode ser alterado por fatores externos operacionais de uma forma fácil. O processo de compostagem inicia-se com o pH a diminuir pela ação das bactérias formadores de ácidos na decomposição do material carbonáceo complexo em ácidos orgânicos complexos. Com o decorrer do processo e a degradação da proteína, o pH sobe até atingir valores alcalinos, 6,5-8,5 (Day & Shaw, 2005);
 - b. O **volume da mistura de resíduos**, que diminui ao longo do processo de compostagem, esperando-se que esta diminuição seja para metade ou mais do volume inicial (Brito, 2005). A diminuição na redução do volume, traz vantagens nos custos de transporte e no aumento da concentração de nutrientes.

2.5.2. SISTEMAS DE COMPOSTAGEM

Vários sistemas de compostagem foram surgindo ao longo dos anos, todos eles com o mesmo fim: tornar o processo rápido, consumir pouca energia e originar um produto final com boas propriedades sem riscos de utilização.

Também ao longo dos anos, diversas classificações dos sistemas de compostagem foram surgindo tendo como base o fator que mais influência o processo – o oxigénio.

Haug (1980) classificou a compostagem em sistemas não-reator e sistemas reator:

- Sistemas não-reator: pilhas com revolvimento, “windrow”, ou pilhas estáticas com sucção de ar, insuflação de ar, ventilação alternada ou híbrido e indução de ar conjugada com controlo de temperatura;
- Sistemas reator: verticais contínuos ou descontínuos, e horizontais ou inclinados estáticos ou rotativos.

2.5.3. QUALIDADE DO PRODUTO

A matéria orgânica estabilizada e humificada – composto - constitui o produto da compostagem. A qualidade do composto é observada pelo desenvolvimento da planta (Sullivan & Miller, 2005). A sua concentração final de nutrientes é muito importante, especialmente o teor de matéria orgânica e a concentração de N que é assimilável pelas plantas, quando o composto é utilizado como suplemento ou em substituição de outras fontes de nutrientes (Sikona, 2003).

O composto pode ser utilizado:

- na agricultura, florestação e horticultura;
- no combate à erosão;
- na recuperação de solos degradados;
- como corretivo de solos pobres;
- na recuperação de taludes degradados de estradas;
- no recobrimento vegetal.

2.5.4. COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA PASTA E DO PAPEL

A produção de pasta e papel gera uma elevada quantidade de resíduos que, de uma maneira ou de outra, são valorizados. Do fluxo de resíduos da IPP, os resíduos de madeira e do descasque da madeira constituem a maior fatia de produção de resíduos, seguido das lamas provenientes da ETAR. Estas são aquelas que mais preocupam o sector da IPP, e que têm vindo a ser alvo de diversos estudos, devido à grande quantidade produzida e à sua composição. Compostos organoclorados, organismos patogénicos e maus cheiros poderão ser encontrados nas lamas de ETAR assim como um pH alcalino e um elevado teor de matéria orgânica.

Como já foi referido anteriormente, as técnicas de valorização dos resíduos da IPP têm sofrido evolução a par de uma cada vez maior preocupação ambiental e social. Das MTD's para a valorização dos resíduos da IPP, salienta-se a aplicação no solo das lamas de ETAR estabilizados por compostagem.

Na compostagem as lamas são submetidas a um tratamento relativamente prolongado, podendo variar entre 3 a 4 meses, onde ocorre a transformação das mesmas em matéria

orgânica estável, pela ação dos MO na presença de O₂ e humidade. Esta transformação ocorre de uma forma facilitada quando as lamas de ETAR são compostadas juntamente com resíduos com um conteúdo elevado de N, uma vez que elas são pobres em nutrientes e com uma razão C:N elevada (Zhang *et al.*, 1993; Feagley *et al.*, 1994; Bellamy *et al.*, 1995; Norrie & Gosselin, 1996).

Vários estudos sobre a compostagem de lamas de ETAR da IPP têm vindo a ser realizados ao longo dos anos. Em 1983, Carter observou na compostagem em grande escala de lamas de ETAR com casca de eucalipto, uma degradação da celulose. A compostagem foi realizada com arejamento forçado, terminando ao fim de 60-90 dias. A rápida degradação ocorreu aquando da mistura de estrume de bovino, o que elevou a taxa de degradação devido à presença de organismos degradadores da celulose. Evanylo & Daniels (1999) produziram ao fim de 8 a 12 semanas um composto estável, com a razão C:N e o teor de nutrientes a indicar um composto de alta qualidade. Biscaia *et al.* (2011), realizaram a co-compostagem de lamas de ETAR da IPP e cama de aviário, obtendo um produto com grau de estabilização e teor em azoto satisfatório e cuja análise de metais revelou níveis inferiores aos regulamentados. Marche *et al.* (2001) mostraram que a compostagem das lamas da ETAR de uma IPP pode atingir bons resultados quando compostadas juntamente com resíduos de madeiras duras, em conjunto com a otimização do arejamento, humidade e razão C:N.

Diversos autores consideram que na compostagem de lamas de ETAR da IPP, a adição de cinzas ajuda a atingir os valores de matéria seca desejados para o arranque do processo, a aumentar a porosidade da lama, reduzindo a densidade, e a aumentar o fluxo de O₂ no composto. Koivula *et al.*, (2004) referiu que esta adição aumenta as concentrações de macro e micronutrientes do composto obtido, incluindo o fósforo, potássio, cálcio, cobre e zinco.

2.6. ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO

A aplicação de lamas no solo é controlada legalmente para impedir uma introdução descontrolada de compostos nefastos à saúde humana e ao ambiente.

Em meados dos anos 70 surgiu a *Diretiva 75/422/CEE do Conselho, de 15 de Julho de 1975*, o primeiro normativo específico sobre resíduos e anos mais tarde surgiu a *Diretiva*

86/278/CEE do Conselho, de 12 de Junho de 1986, relativa à proteção do ambiente e em especial dos solos na utilização agrícola das lamas.

Esta última Diretiva foi transposta para a ordem jurídica nacional pelo *Decreto-Lei (DL) n.º 446/91, de 22 de Novembro* que anos mais tarde foi revogado pelo *DL n.º 118/2006, de 21 de Junho*. Este regula a aplicação de lamas de depuração na agricultura, transpondo da *Diretiva 86/278/CEE* da entrada em vigor e da aplicação deste último DL, surgiu a necessidade da sua atualização de forma a simplificar e tornar mais adequado o procedimento de licenciamento do uso de lamas de depuração. Esta atualização ocorreu com o *DL n.º 276/2009, de 2 de Outubro*, tendo como base a classificação da utilização agrícola de lamas de depuração como uma:

- operação de valorização, de acordo com o *anexo III-B da Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março*;
- melhor técnica disponível, de acordo com o *DL n.º 173/2008, de 26 de Agosto*, que regula a prevenção e o controlo integrados da poluição.

Posto isto, o *DL n.º 276/2009, de 2 de Outubro*, regula a utilização de lamas de depuração em solos agrícolas garantindo que esta técnica não tenha efeitos nocivos para o homem, solos, vegetação, animais e o ambiente em geral, encorajando a sua correta utilização.

O *DL n.º 190/2004, de 17 de Agosto*, regula a colocação no mercado de adubos e corretivos agrícolas, tendo revogado o *DL anterior n.º 184/99, de 26 de Maio*, que incluía todas as diretivas comunitárias sobre as regras de colocação no mercado de adubos e corretivos agrícolas. Este DL surgiu da aprovação do *Regulamento (CE) n.º 2003/2003, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de Outubro*, relativo aos adubos, que impôs a modificação da legislação nacional sobre matérias fertilizantes.

O *artigo 3º do DL n.º 190/2004, de 17 de Agosto*, define as condições de colocação no mercado de determinados tipos de adubos, mas a alínea *n.º 8* prevê que a colocação no mercado de outras matérias fertilizantes deve ser sujeita a autorização prévia nos termos da *Portaria n.º 1322/2006, de 24 de Novembro*.

Por fim, o *DL n.º 73/2011, de 17 de Junho*, altera o regime geral de gestão de resíduos, *DL n.º 178/2006, de 5 de Setembro*, e transpõe a *Diretiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro*, relativa aos resíduos. Este DL regula as



diversas operações de gestão de resíduos: recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização de resíduos, descontaminação de solos e monitorização dos locais de deposição depois do seu encerramento. Além disso, o *n.º 1 do artigo 23º* estabelece que as operações de armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos estão sujeita a licenciamento, *Portaria n.º 1023/2006, de 20 de Setembro*.

Relativamente à utilização de composto, surgiu em 2004, uma “Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto” com base no “Working Document – Biological Treatment of Biowaste – 2nd Draft”, DG ENV.A.2, 12 Fevereiro de 2001. Estas propostas de regulamentação estabelecem as especificações para o composto, definem classes de estabilidade, descrevem critérios para a utilização e restrições, para evitar efeitos indesejáveis para o solo, água, plantas, animais e ser humano. Também listam quais os resíduos que podem ser utilizados na produção de composto (Cunha-Queda, 2009).

3. CASO DE ESTUDO

O caso de estudo compreende uma experiência de valorização de resíduos da IPP e a projeção da informação e conclusões aí obtidas, num modelo de gestão de resíduos desta indústria através da produção de um corretivo agrícola. O modelo de gestão foi desenvolvido com base no seu impacto ao nível económico e ambiental.

O estudo teve por base a realidade de uma IPP nacional, o grupo PortucelSoporcel (**gPS**) avaliando-se as suas três unidades fabris, Portucel-Cacia, Soporcel-Figueira da Foz e Portucel-Setúbal. O gPS é atualmente uma das mais fortes presenças de Portugal no Mundo, com produtos em mais de cem países. Alguns aspetos do gPS de referir:

- Volume de negócios anual de 1,5 mil milhões de euros – cresceu 36% após a entrada em funcionamento da nova Fábrica de Papel de Setúbal (2009 a 2011). No mesmo período, o volume vendido de pasta e papel cresceu 9%;
- 1º produtor a nível europeu e 6º a nível mundial de papéis de impressão e escrita não revestidos (*UWF*);
- 1º produtor a nível europeu e 4º a nível mundial de pasta branqueada de eucalipto (*BEKP*);
- Gere cerca de 120 mil hectares de floresta em Portugal – 61% da floresta portuguesa certificada pela *FSC* (Forest Stewardship Council) e 54% da floresta certificada pelo *PEFC* (Sistema Português de Certificação da Gestão Florestal Sustentável). As plantações de eucaliptos correspondem a 72% e os restantes a 28% são utilizados noutro tipo de ocupações;
- Assegura cerca de 4% da produção total de energia elétrica em Portugal;
- 1º produtor de energia a partir de biomassa (grupo PortucelSoporcel).

A gestão dos resíduos produzidos no gPS tem acompanhado a evolução das técnicas disponíveis para a sua valorização, sendo que atualmente esta gestão pode ser realizada por:

- Produção de energia, pela queima das LP, LB e RPM;
- Aplicação de mistura de resíduos (LP, LB, Cz e areia da caldeira a biomassa) na agricultura e floresta;
- Aplicação de resíduos (Cz e areia da caldeira a biomassa, *dregs* e *grits*)
- Reutilização da fibra.

3.1. METODOLOGIA

A **Figura 11** esquematiza a metodologia seguida para a realização deste trabalho, tendo por base os objetivos definidos primariamente. Uma análise à figura permite verificar que o trabalho se desenrolou em duas fases:

- Uma primeira composta por trabalho prático onde foi produzido um corretivo agrícola candidato à homologação pela Portaria n.º 1322/2006 de 24 de Novembro;
- E uma segunda de elaboração do projeto de gestão de resíduos da IPP, que envolveu uma análise das características do corretivo agrícola produzido, de modo a verificar o seu contributo para a IPP.

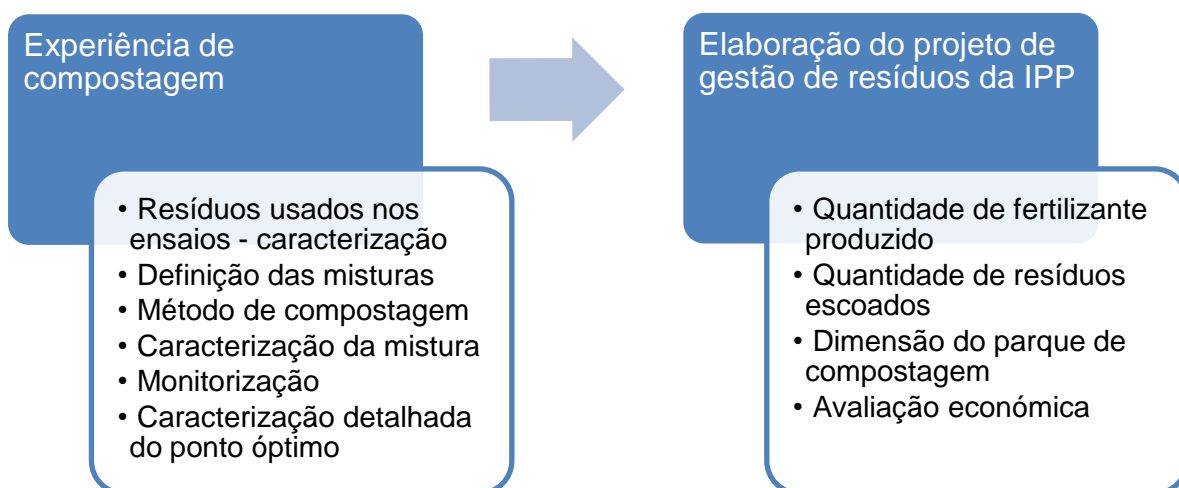


Figura 11 – Metodologia do trabalho.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Através de diversos métodos, foi possível realizar análises aos fatores que afetam o desenvolvimento do processo de compostagem.

3.2.1. PROCESSO DE COMPOSTAGEM

A componente experimental envolvendo o estudo do processo de compostagem constitui toda a parte prática deste trabalho, dividindo-se em diversas fases: seleção e caracterização dos resíduos usados nas experiências de compostagem, definição e caracterização das misturas de resíduos, seleção do método de compostagem mais indicado, monitorização do processo de compostagem selecionado e caracterização da mistura para fins de homologação.

Os resíduos utilizados na experiência de compostagem tiveram origem da unidade fabril da Figueira da Foz, gPS.

- **RESÍDUOS USADOS NOS ENSAIOS - CARACTERIZAÇÃO**

A seleção dos resíduos a usar teve por base as suas características, nomeadamente a sua capacidade de biodegradação uma vez que esta é o fator mais significativo para o dimensionamento e sucesso do processo de estabilização por compostagem. De todos os resíduos produzidos no processo produtivo de pasta e papel, os mais indicados para este tipo de trabalho são as LP, LB, Cz da caldeira a biomassa e RPM ou Casca.

Os resíduos selecionados e que sofreram estabilização por compostagem, foram sujeitos a uma caracterização inicial detalhada, **Tabela 3**, permitindo o desenvolvimento das tarefas seguintes.

Tabela 3 – Parâmetros caracterizados nos resíduos utilizados nos ensaios.

Parâmetro			
Fertilizantes		Ambientais	
Humidade	Cálcio Total	Cádmio Total	Chumbo Total
Matéria orgânica	Magnésio Total	Crómio Total	Zinco Total
Azoto Total	Enxofre Total	Cobre Total	AOX
Fósforo Total	Boro Total	Mercúrio Total	
Potássio Total	Razão C:N	Níquel Total	

3.2.1.1. DEFINIÇÃO DAS MISTURAS

A definição das misturas de resíduos a serem utilizadas no processo de compostagem é um ponto importante, uma vez que uma mistura equilibrada permite alcançar o objetivo final definido. Uma mistura equilibrada é aquela que satisfaz o balanço energético e evita condições limitantes da velocidade das reações que ocorrem ao longo do processo e que poderão ser causadas pela falta de humidade, baixa porosidade ou baixas concentrações de nutrientes.

Na definição das misturas teve-se como princípios:

- As condições que não põem em causa o processo de compostagem:
 - % mínima de agente de porosidade superior a 15%;
 - Razão C:N entre 24 e 35;
 - Humidade entre 45 e 60%;

- Níveis de AOX inferiores a 500mgCl/kg (DL n.º 276/2009, de 2 de Outubro);
- E as características individuais dos resíduos:
 - As LP e as LB fornecem os nutrientes necessários ao bom desenvolvimento do processo de compostagem. As LP apresentam um teor elevado de matéria orgânica de origem lenhino-celulósica, originando uma razão C:N alta. As LB são também constituídas maioritariamente por matéria orgânica com elevadas concentrações de N e concentrações satisfatórias de P.
 - As Cz da caldeira a biomassa apresentam um elevado teor de Ca que permite corrigir o pH dos solos;
 - O RPM ou a Casca têm o papel de agentes de porosidade da mistura de resíduos, mantendo as condições aeróbias durante todo o processo de compostagem.

Posto isto, a composição das misturas de resíduos, em base tal qual, que permite um bom arranque do processo de compostagem é a seguinte:

- 30% de Lamas Primárias;
- 30% de Lamas Biológicas;
- 15% de Cz;
- 25% de Casca ou RPM.

Na **Tabela 4** encontram-se descritas as caracterizações individuais de diversos parâmetros, fertilizantes e ambientais, dos resíduos selecionados e os valores reais das misturas no arranque do processo, no dia 0.

A mistura de resíduos e a construção das pilhas foram realizadas recorrendo a uma retroescavadora, **Figura 12**.



Figura 12 – Mistura de resíduos.

Tabela 4 – Caracterização individual dos resíduos e das misturas.

Parâmetro	Resíduos					Misturas iniciais	
	LP	LB	Cz	Casca	RPM	Pilhas com casca	Pilhas com RPM
Fertilizantes							
Humidade (%)	74,8	85,1	12,5	58,4	52,2	64,8	64,3
Matéria Orgânica (%)	54,2	74,1	1,5	91,2	53,2	42,3	38,3
pH	7,42	7,03	12,4	6,3	8,6	9,03	8,58
Azoto Total (N,mg/kg)	20168	40988	106	2630	2018	9899	6543
Fósforo Total (P ₂ O ₅ ,mg/kg)	36024	70709	33054	2255	6829	6955	6923
Fósforo Total (P,mg/kg)	3930	7714	3606	246	745	3035	3021
Razão C:N	47	15	-	-	-	22	27
Hidrogénio (%)	-	-	-	-	-	1,5	0,39
Azoto (%)	1,1	2,5	-	-	-	1,2	0,6
Carbono (%)	52	38	-	-	-	26	16
Potássio Total (K ₂ O,g/kg)	1,7	3,7	6,3	3,1	5,8	9,1	11
Potássio Total (K,g/kg)	1,4	3,1	5,2	2,6	4,8	7,6	9,3
Cálcio Total (Ca,g/kg)	16,6	8,2	102	7,3	36	115	108
Magnésio (Mg,g/kg)	2,0	2,7	16	1,6	2,4	6,4	6,3
Enxofre Total (S,mg/kg)	< Lq					< Lq	
Boro Total (B,mg/kg)	31	69	61	< 15Lq		55	50
Ambientais							
Cádmio Total (Cd,mg/kg)	0,73	0,78	0,9	< 0,8Lq		1	1,7
Crómio Total (Cr,mg/kg)	24	31	19	< 1,8Lq		17	19
Cobre Total (Cu,mg/kg)	16	15	28	6,2	112	14	10
Mercurio Total (Hg,mg/kg)	0,23	0,15	193	110	16	0,23	0,17
Níquel Total (Ni,mg/kg)	11	19	17	< 4,7Lq		9	12
Chumbo Total (Pb,mg/kg)	13	13	28	< 5,7Lq		8,4	15
Zinco Total (Zn,mg/kg)	50	78	60	< 7,3Lq		42	74
AOX (mgCl/kg)	1819	1773	52	48	49	426	404

3.2.1.2. MÉTODO DE COMPOSTAGEM

O método de compostagem selecionado foi a construção de seis pilhas com a mistura de resíduos descrita anteriormente, com as seguintes dimensões: 3m de altura, 4m de largura, 6m de comprimento e 4m de espaçamento que permite a construção, controlo e desmantelamento das mesmas, conforme ilustra a **Figura 13**.

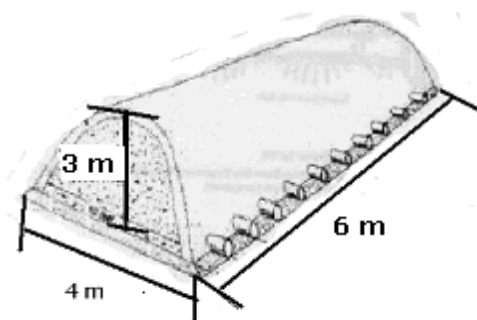


Figura 13 – Esquema das dimensões das pilhas construídas.

Nos ensaios de compostagem testaram-se várias modalidades de agente de porosidade, técnicas de arejamento e cobertura:

- Agente de porosidade: Casca ou RPM;
- Técnicas de arejamento:
 - Passivo: colocaram-se tubos perfurados na base da pilha, promovendo um arejamento natural sem recorrer a um arejamento forçado ou mecânico;
 - Mecânico: realizado pelo revolvimento da pilha com a ajuda de uma retroescavadora;
 - Sem arejamento: a pilha não tinha nenhum tipo de arejamento, era uma pilha estática;
- Cobertura: sem ou com manta geotêxtil (material poroso e impermeável).

O que se traduziu na construção das pilhas com as características descritas na **Tabela 5**.

Todo o processo de compostagem, mistura de resíduos, construção das pilhas de compostagem e monitorização da evolução do processo, foi desenvolvido nos meses de Março a Outubro do ano 2010.

Tabela 5 – Composição das pilhas de compostagem em termos de mistura de resíduos, agente de porosidade, técnica de arejamento e cobertura.

Pilha	Resíduos			Agente de porosidade		Técnica de arejamento			Cobertura	
	LP	LB	Cz	Casca	RPM	Passivo	Mecânico	Sem	Com	Sem
C_P_C	X	X	X	X		X			X	
RPM_P_C	X	X	X		X	X			X	
C_E_C	X	X	X	X				X	X	
C_M_C	X	X	X	X			X		X	
RPM_M	X	X	X		X		X			X
RPM_M_C	X	X	X		X		X		X	

Na **Figura 14** encontram-se algumas fotografias das pilhas construídas neste caso de estudo.



a)



b)



c)



d)

Figura 14 - Fotografias de algumas pilhas construídas: **a)** construção de uma pilha com arejamento passivo, **b)** pilha de arejamento passivo coberta, **c)** pilha sem cobertura e com arejamento mecânico e **d)** pilha estática e com cobertura.

3.2.1.3. COMPOSIÇÃO DAS PILHAS

Foram constituídas duas misturas de resíduos, para formar as pilhas, que se distinguem pelo tipo de agente de porosidade, RPM e casca. A composição das pilhas apresenta-se na **Tabela 6**.

Tabela 6 – Composição real das misturas de resíduos.

Agente de porosidade	Composição das pilhas	Resíduos				
		LP	LB	Cz	Casca	RPM
Casca	% btq	32	31	15	22	-
	% bs	24	13	37	27	-
	V (m ³)	11	11	6	22	-
	MVG (t/m ³)	1,03	0,97	0,92	0,33	-
RPM	% btq	33	31	15	-	21
	% bs	24	13	37	-	26
	V (m ³)	11	11	6	-	17
	MVG (t/m ³)	1,03	0,97	0,92	-	0,47

3.2.1.4. MONITORIZAÇÃO

Ao longo do processo de estabilização dos resíduos, por pilhas de compostagem, a monitorização da sua evolução foi realizada de duas maneiras:

1. **Periodicamente:** foram monitorizados a temperatura, o pH e a humidade. A periodicidade desta monitorização, inicialmente, era realizada três vezes por semana, passando a duas vezes e por fim a uma única vez por semana. A diminuição da periodicidade deveu-se ao facto de não se terem observado variações que justificassem uma monitorização com a frequência inicial.

A monitorização da temperatura foi realizada medindo-se a mesma em 24 pontos distintos na pilha. De modo a ser mais fácil uma interpretação posterior da evolução deste parâmetro, consideraram-se 3 secções transversais na pilha para avaliação da temperatura. Em cada secção foi medida a temperatura em 8 pontos:

- No interior e à superfície do material;
- De cada lado do eixo da pilha;
- Na base;
- A meia altura;

totalizando 4 medições na base da pilha, T_b, e 4 medições a meia altura, T_{ma}.

A **Figura 15** e a **Tabela 7** identificam as secções de monitorização de temperatura e os pontos seleccionados, sendo que:

- T_ma é a temperatura média obtida nos 2 pontos interiores, a meia altura, de ambos os lados da pilha;
- T_b é a temperatura média obtida nos 2 pontos interiores, na base, de ambos os lados da pilha.

2. **Detalhadamente:** englobou a amostragem das misturas em degradação e a análise dos parâmetros descritos na **Tabela 8**. A monitorização detalhada permitiu verificar qual o estado de degradação das misturas de resíduos, verificar se as misturas já teriam sofrido um processo de estabilização que permitisse a sua aplicação florestal.

A caracterização das misturas realizadas ao longo de todo o processo de compostagem foi em muito idêntica à caracterização inicial e individual dos resíduos utilizados.

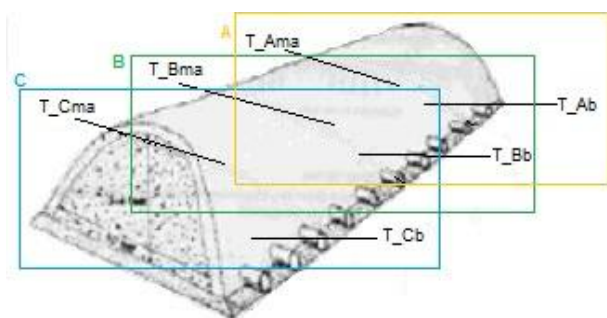


Tabela 7- Identificação das secções de monitorização da temperatura.

Secção	Monitorização da temperatura
A	T_Ama e T_Ab
B	T_Bma e T_Bb
C	T_Cma e T_Cb

Figura 15 – Esquema dos pontos de medição da temperatura.

Tabela 8 - Parâmetros caracterizados na mistura de resíduos.

Parâmetro				
Fertilizantes		Ambientais		Outros
Humidade	Cálcio Total	Cádmio Total	Chumbo Total,	PCI pH Temperatura
Matéria orgânica	Magnésio Total	Crómio Total	Zinco Total	
Azoto Total	Enxofre Total	Cobre Total	AOX	
Fósforo Total	Boro Total	Mercúrio Total		
Potássio Total	Razão C:N	Níquel Total		

É importante fazer referência ao modo como a recolha de amostras para analisar foi efetuada. A amostragem seguiu a mesma linha que a medição da temperatura, foram

recolhidas pequenas amostras em diferentes pontos da pilha, **Figura 15** e a **Tabela 7**, dando origem a uma amostra composta representativa da pilha no seu todo.

3.2.1.5. CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA PARA FINS DE HOMOLOGAÇÃO

A caracterização da mistura para fins de homologação teve em conta a determinação de um tempo ótimo de operação, ou seja, a determinação de um dia em que o processo já estaria em condições para ser interrompido e ser possível aplicar a mistura no solo sem qualquer efeito prejudicial. A necessidade de determinar um tempo ótimo deveu-se ao elevado período de compostagem observado, com temperaturas superiores a 45°C. Para definir este tempo, interessou que o produto permitisse:

- Obter uma mistura estabilizada;
- Minimizar o tempo de compostagem, uma vez que corresponde à minimização da área necessária para a realização do processo;
- Reduzir o custo de transporte, espalhamento e aplicação do produto no solo.

A caracterização do tempo ótimo de operação, permitiu verificar qual o estado e características da mistura de resíduos candidata à homologação pela *Portaria n.º 1322/2006, de 24 de Novembro*.

Esta caracterização é em tudo igual às caracterizações iniciais e detalhadas realizadas durante o processo de estabilização, incluindo parâmetros adicionais exigidos na Portaria e que se apresentam na **Tabela 9**:

Tabela 9 - Parâmetros caracterizados no ponto considerado como ótimo.

Parâmetros		
Fertilizantes	Ambientais	Outros
Humidade	Cádmio Total	PCI
Matéria orgânica	Crómio Total	pH
Azoto Total	Cobre Total	Temperatura
Fósforo Total	Mercúrio Total	C, N, H (análise elementar)
Potássio Total	Níquel Total	Escherichia Coli
Cálcio Total	Chumbo Total	Salmonella spp
Magnésio Total	Zinco Total	Inertes
Enxofre Total	AOX	Grau de solubilidade
Boro Total		Massa volúmica



Continuação da Tabela 9

Parâmetros		
Fertilizantes	Ambientais	Outros
Razão C:N		Classificação granulométrica Teste de Dewar (auto-aquecimento)

3.2.1.6. MÉTODOS ANALÍTICOS

Os métodos analíticos encontram-se resumidos na **Tabela 10** e os procedimentos adotados podem ser consultados em mais detalhe no **Anexo A**.

Tabela 10 – Referência dos métodos analíticos utilizados para analisar os diversos parâmetros.

Análise	Unidade	Métodos utilizados
pH	Es. So.	NP EN 12176:2000
Humidade (105°C)	%	EN 128880:2000
Matéria Orgânica (550°C)	%	EN 12879:2000
Azoto Total, N	mg/kg	EN 13342+SMEWW 4500-NO ₃ B.EAM 21 ^a Ed
Azoto Nítrico, NO ₃	mg/kg	SMEWW 4500-NO ₃ B.EAM 21 ^a Ed
Azoto Amoniacal, NH ₄	mg/kg	NP-730 – 1987
Fósforo Total, P (UV/VIS)	mg/kg	EN 13346:2000 (método A) e SMEWW 4500-P-C EAM 21 ^a Ed
^{a)} Potássio Total, K	g/kg	ICP-OES ISO 11885:2007
^{a)} Magnésio Total, Mg	g/kg	
^{a)} Cálcio Total, Ca	g/kg	
^{a)} Cádmio Total, Cd	mg/kg	
^{a)} Cobre, Cu	mg/kg	
^{a)} Níquel, Ni	mg/kg	
^{a)} Chumbo, Pb	mg/kg	
^{a)} Zinco, Zn	mg/kg	
^{a)} Crómio Total, Cr	mg/kg	
^{a)} Boro, B	mg/kg	
^{a)} Mercúrio, Hg	mg/kg	SMEWW 3112 AA-GVF 21 ^a Ed
AOX	mgCl/kg	DIN 384 14-518
PCI	Cal/g	CEN/TS 14918
Carbono	%	Análise Elementar - CEN/TS 15104
Enxofre	%	
Hidrogénio	%	
Azoto	%	

a) Digestão ácida com água-régia (método interno)

3.2.2. ELABORAÇÃO DO PROJETO DE GESTÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA PASTA E DO PAPEL

A elaboração do projeto de gestão de resíduos da IPP é a segunda e última fase da metodologia de trabalho deste caso de estudo. O seu objetivo é criar uma ferramenta de gestão sustentável dos resíduos produzidos na IPP.

Para que tal seja possível, foi necessário:

- Quantificar os resíduos produzidos na IPP e que foram alvo de estabilização/valorização neste caso de estudo;
- Quantificar o corretivo agrícola produzido através do processo de compostagem escolhido, as pilhas de misturas de resíduos;
- Dimensionar o parque de compostagem necessário para o desenvolvimento deste projeto de valorização de resíduos e que permite o bom escoamento dos resíduos produzidos;
- E por fim, uma avaliação económica do projeto de modo a identificar as vantagens da gestão dos resíduos da IPP pela sua estabilização em pilhas de misturas de resíduos.

O projeto de gestão de resíduos foi elaborado para as 3 fábricas do gPS, sabendo que cada uma delas teria de ter o seu próprio parque de compostagem. A localização das unidades fabris do gPS encontra-se na **Figura 16**.

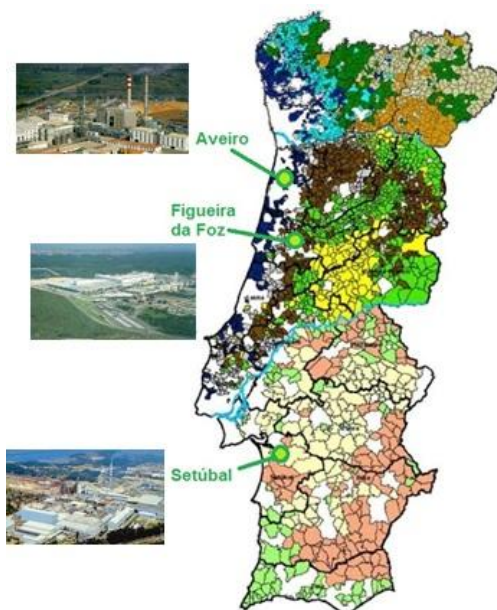


Figura 16 – Localização das unidades fabris pertencentes ao gPS.

Só foi possível elaborar o projeto após recolher diversas informações, para cada uma das fábricas:

- Quantitativos da produção de resíduos das 3 unidades fabris do gPS, nomeadamente dos fluxos de resíduos de LP, LB, Cz;
- Distâncias da unidade fabril onde são produzidos os resíduos até ao local onde irá ser construído o parque de compostagem;
- Dimensões das áreas disponíveis para a construção do parque de compostagem;
- Custo de disponibilização do terreno com base nos custos de construção em aterro;
- Custos das operações de transporte, mistura de resíduos, espalhamento, incorporação;
- Custos de monitorização dos solos;
- Custos da fertilização tradicional;
- Custos da gestão de RPM.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. CARACTERIZAÇÃO INICIAL DE RESÍDUOS E MISTURAS

A caracterização inicial das misturas já foi apresentada anteriormente, **Tabela 4**, juntamente com as caracterizações individuais dos resíduos utilizados na mistura.

O DL n.º276/2009, de 2 de Outubro, impõe valores limites de emissão (**VLE**) de metais pesados na aplicação de lamas no solo. Este DL serviu de guia durante todo o processo de compostagem, uma vez que se partiu do princípio que os valores de metais pesados no produto produzido cumpririam o DL da aplicação de lamas frescas no solo, de modo a garantir uma redução destes metais até aos níveis estipulados para o produto fresco, lamas de ETAR.

Deste modo, na **Tabela 11** encontram-se os valores de metais pesados obtidos nas caracterizações dos resíduos e das misturas de lamas, e os VLE estipulados em DL. Da análise desta tabela e relembrando a **Tabela 4**, verifica-se que as misturas imediatamente ao início do processo já possuíam algum interesse fertilizante, com os níveis de metais pesados inferiores aos limites estipulados por lei. Este cumprimento dos VLE permite que a mistura de resíduos só por si, sem qualquer tipo de estabilização,

possa ser incorporada no solo sem que ocorra um aumento prejudicial destes contaminantes no solo.

Tabela 11 – Valores de metais pesados nos resíduos e nas misturas de resíduos, e o VLE estipulados no DL n.º 276/2009, de 2 de Outubro.

Parâmetro	Resíduos					Misturas		DL n.º 276/2009
	LP	LB	Cz	Casca	RPM	Casca	RPM	
Cádmio Total (Cd,mg/kg)	0,73	0,78	0,9	< 0,8Lq		1	1,7	20
Crómio Total (Cr,mg/kg)	24	31	19	<1,8Lq	6,7	17	19	1000
Cobre Total (Cu,mg/kg)	16	15	28	6,2	112	14	10	1000
Mercúrio Total (Hg,mg/kg)	0,23	0,15	193	110	16	0,23	0,17	16
Níquel Total (Ni,mg/kg)	11	19	17	< 4,7Lq		9	12	300
Chumbo Total (Pb,mg/kg)	13	13	28	< 5,7Lq		8,4	15	750
Zinco Total (Zn,mg/kg)	50	78	60	<7,3Lq	20	42	74	2500
AOX (mgCl/kg)	1819	1773	52	48	49	426	404	

Relembrando as condições que não põem em causa o processo de compostagem, construiu-se a **Tabela 12** com os resultados das caracterizações das misturas:

Tabela 12 – Valores de humidade, razão C:N e AOX nas misturas de resíduos.

Parâmetro	Misturas		Condições para um bom arranque do processo
	Casca	RPM	
Humidade (%)	64,8	64,3	45-60
Razão C:N	22	27	24-35
AOX (mgCl/kg)	426	404	< 500

Relativamente às condições que serviram de base à composição da mistura de resíduos, verifica-se que as humidades iniciais das misturas são ligeiramente superiores ao aconselhável, a razão C:N, por sua vez, é inferior e os níveis de AOX são inferiores aos valores limite legais.

3.3.2. EVOLUÇÃO DA COMPOSTAGEM

Como já foi referido anteriormente, testaram-se várias modalidades de agente de porosidade, tipo de arejamento e a existência ou não de cobertura. A análise da evolução do processo de compostagem para os parâmetros temperatura e humidade, irá ser apresentada da seguinte forma:

- Casca vs. RPM: arejamento passivo ou mecânico e cobertura;
- Tipo de arejamento:
 - Pilhas com casca – arejamento passivo, mecânico ou sem arejamento e com cobertura;
 - Pilhas com RPM – arejamento passivo ou mecânico e cobertura;
- Existência ou não de cobertura: arejamento mecânico e RPM como agente de porosidade.

O parâmetro pH irá ser analisado ao longo do tempo para as seis pilhas em simultâneo.

3.3.2.1. TEMPERATURA

A análise da evolução da temperatura ao longo de todo o processo de compostagem foi realizada tendo em conta as secções criadas para a sua mediação, **Figura 15** e **Tabela 7**.

- **CASCA VS. RPM**

As figuras apresentadas de seguida permitem a análise de evolução da temperatura nas pilhas com diferentes agentes de porosidade, com arejamento passivo e cobertura, **Figura 17**, ou com arejamento mecânico e cobertura, **Figura 18**. Em todas as modalidades testadas observa-se um bom arranque do processo. Todas elas iniciaram o processo com temperaturas entre os 15°C e os 17°C, alcançando ao fim de uma semana temperaturas entre os 40°C e os 65°C. Comparativamente as pilhas com casca atingiram temperaturas ligeiramente superiores às atingidas pelas pilhas com RPM. Em qualquer modalidade testada, observou-se um longo período com temperaturas elevadas, acima de 45°C.

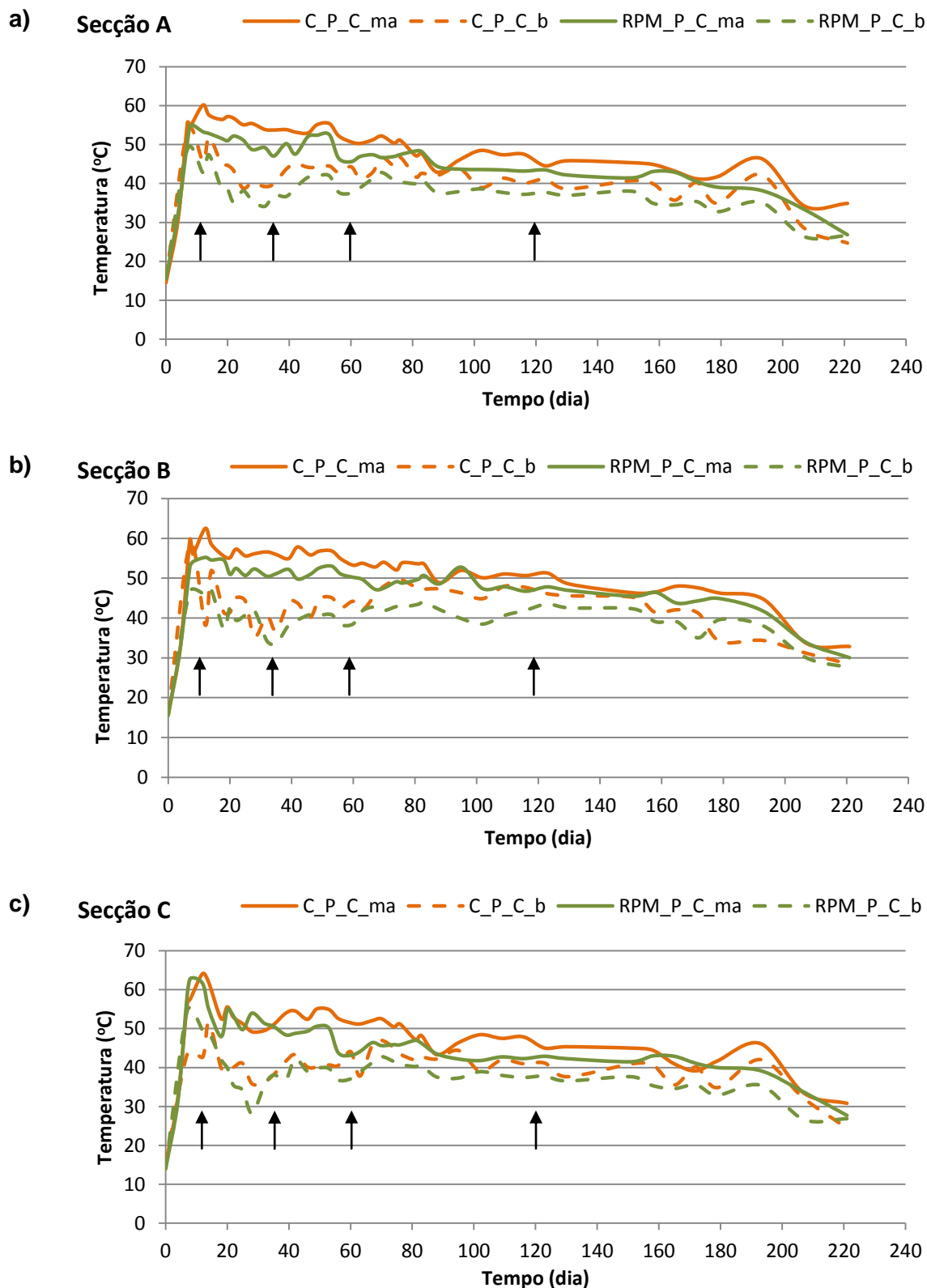


Figura 17 - Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas com os diferentes agentes de porosidade, com arejamento passivo e cobertura (C_P_C e RPM_P_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).

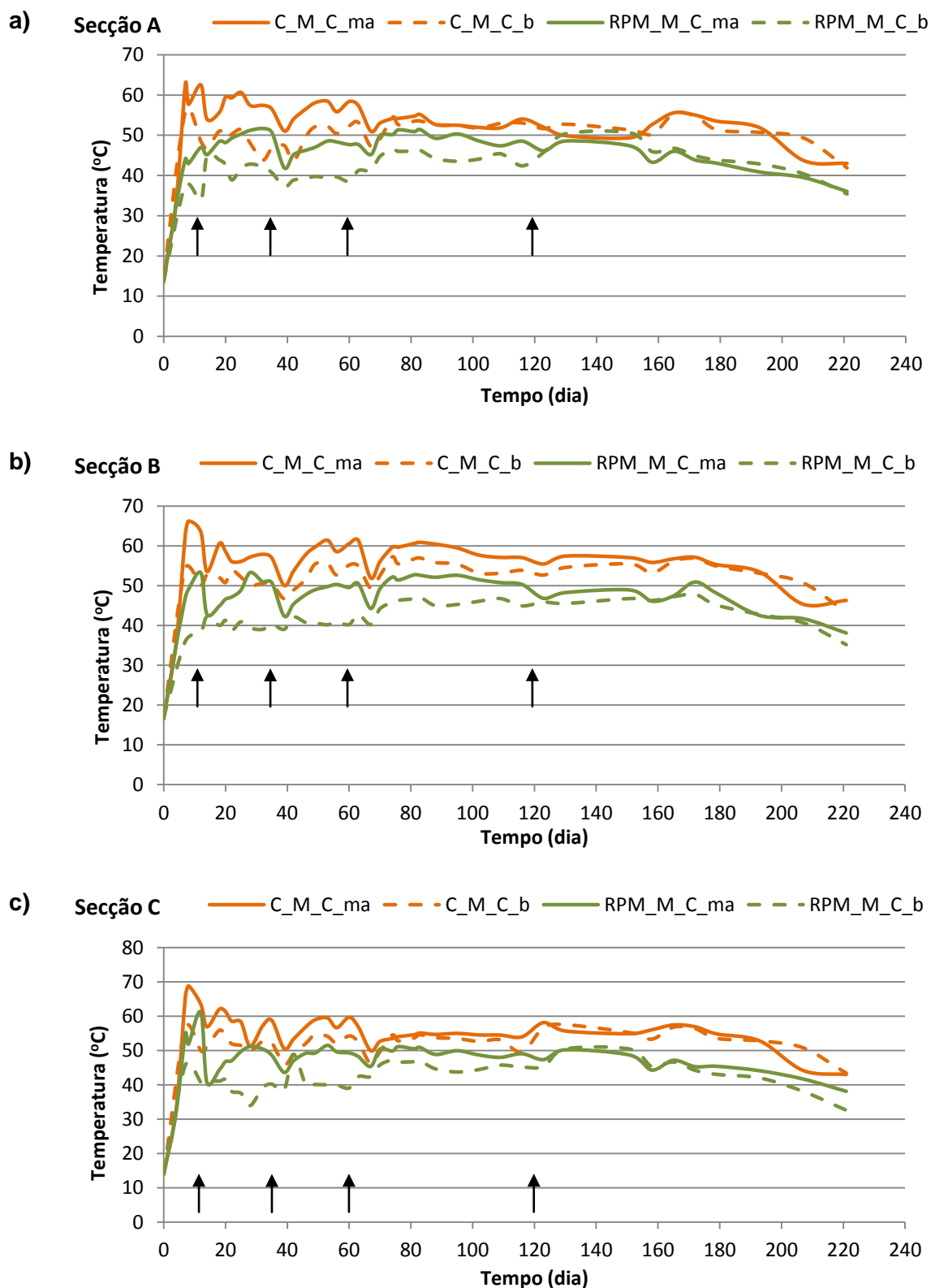


Figura 18 – Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas com os diferentes agentes de porosidade, com arejamento mecânico e cobertura (C_M_C e RPM_M_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).

• TIPO DE AREJAMENTO

As figuras apresentadas de seguida permitem analisar a evolução da temperatura nas pilhas com diferentes tipos de arejamento, com casca ou RPM como agente de porosidade e com cobertura.

Iniciando a análise pelas pilhas com casca como agente de porosidade, **Figura 19 (a), (b) e (c)**, observa-se um comportamento idêntico em todas as pilhas. As temperaturas medidas a meia altura da pilha subiram acima de 50°C ao fim de uma semana decorrida desde o arranque do processo de compostagem, diminuindo por volta do 35º dia, sendo esta a tendência até ao último dia de monitorização do processo. Esta análise é feita para os três tipos de arejamento. Relativamente às temperaturas atingidas na base da pilha, observa-se que baixaram com o decorrer do processo, com tendência a aproximarem-se das primeiras temperaturas, a meia altura.

A diferença do tipo de arejamento mecânico para os restantes, é o simples facto de que a(s) pilha(s) que têm este tipo de arejamento sofre(m) um revolvimento mecânico onde a mistura de resíduos é novamente misturada permitindo que os resíduos mais degradados se misturem com os resíduos menos degradados proporcionando uma entrada de O₂ essencial ao bom desenvolvimento do processo de compostagem.

Esta diferença observa-se na variação da temperatura a cada revolvimento. A temperatura no dia seguinte ao revolvimento diminui, subindo novamente para os níveis iniciais. Durante todo o ensaio, o revolvimento foi realizado quatro vezes durante todo o processo de compostagem (12º, 35º, 63º e 116º dias). Observa-se que o último revolvimento não influenciou da mesma maneira o desenvolvimento do processo como os três primeiros, não ocorrendo uma diminuição seguida de um aumento da temperatura.

Finalizando a análise pelas pilhas com RPM como agente de porosidade, **Figura 20 (a), (b) e (c)**, observa-se um comportamento muito idêntico ao das pilhas com casca. As temperaturas a meia altura da pilha, subiram a valores que rondam os 50°C ao fim de uma semana decorrida desde o arranque do processo de compostagem, diminuindo com o decorrer do processo. Relativamente às temperaturas medidas na base da pilha, também se verifica que estas tendem a aproximarem-se das temperaturas a meia altura. Por fim, quanto às diferenças de tipo de arejamento a análise é exatamente a mesma feita para as pilhas com casca e tipos de arejamento diferentes.

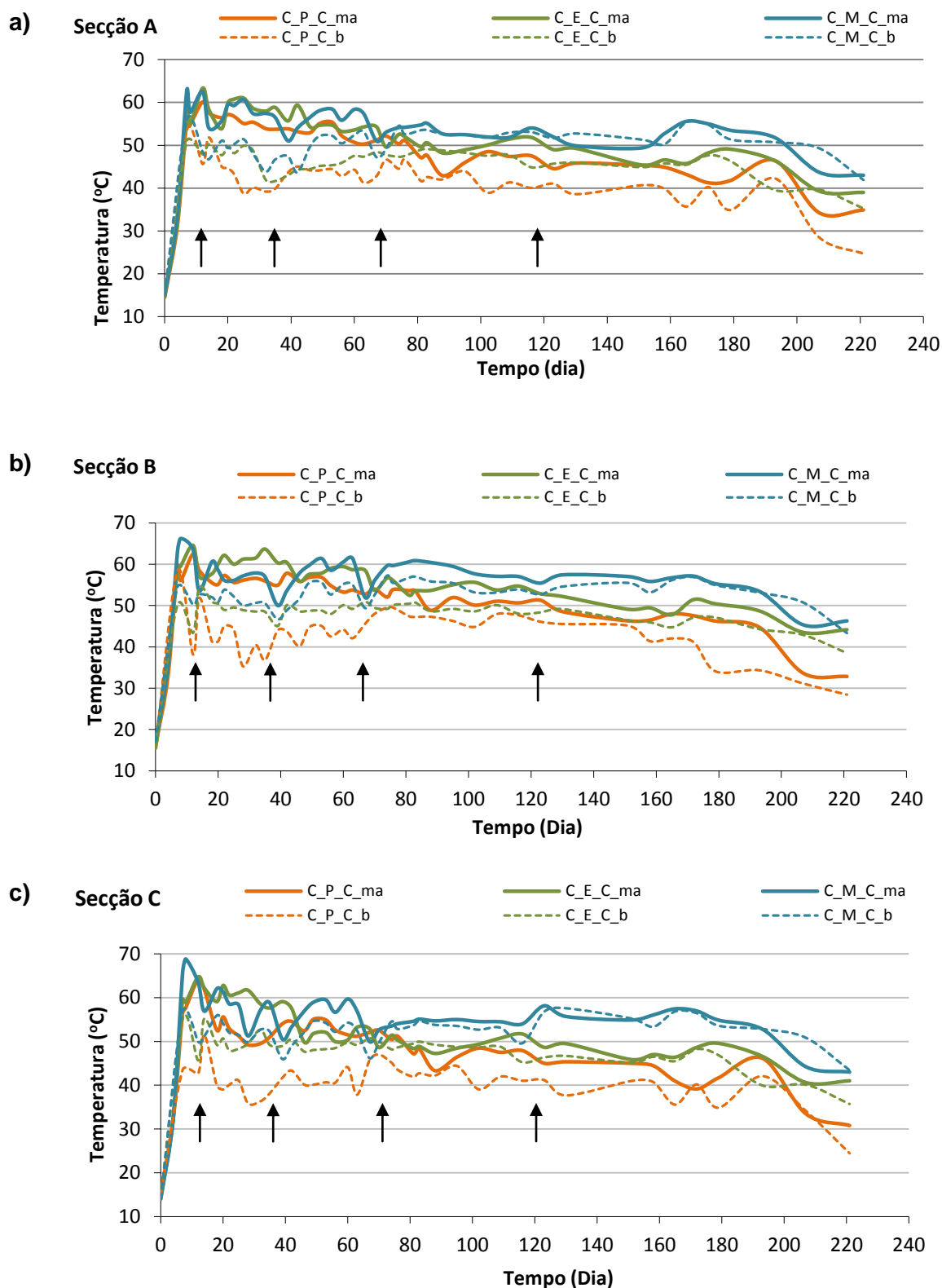


Figura 19 – Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas com diferentes tipos de arejamento, com casca e cobertura (C_P_C, C_E_C e C_M_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).

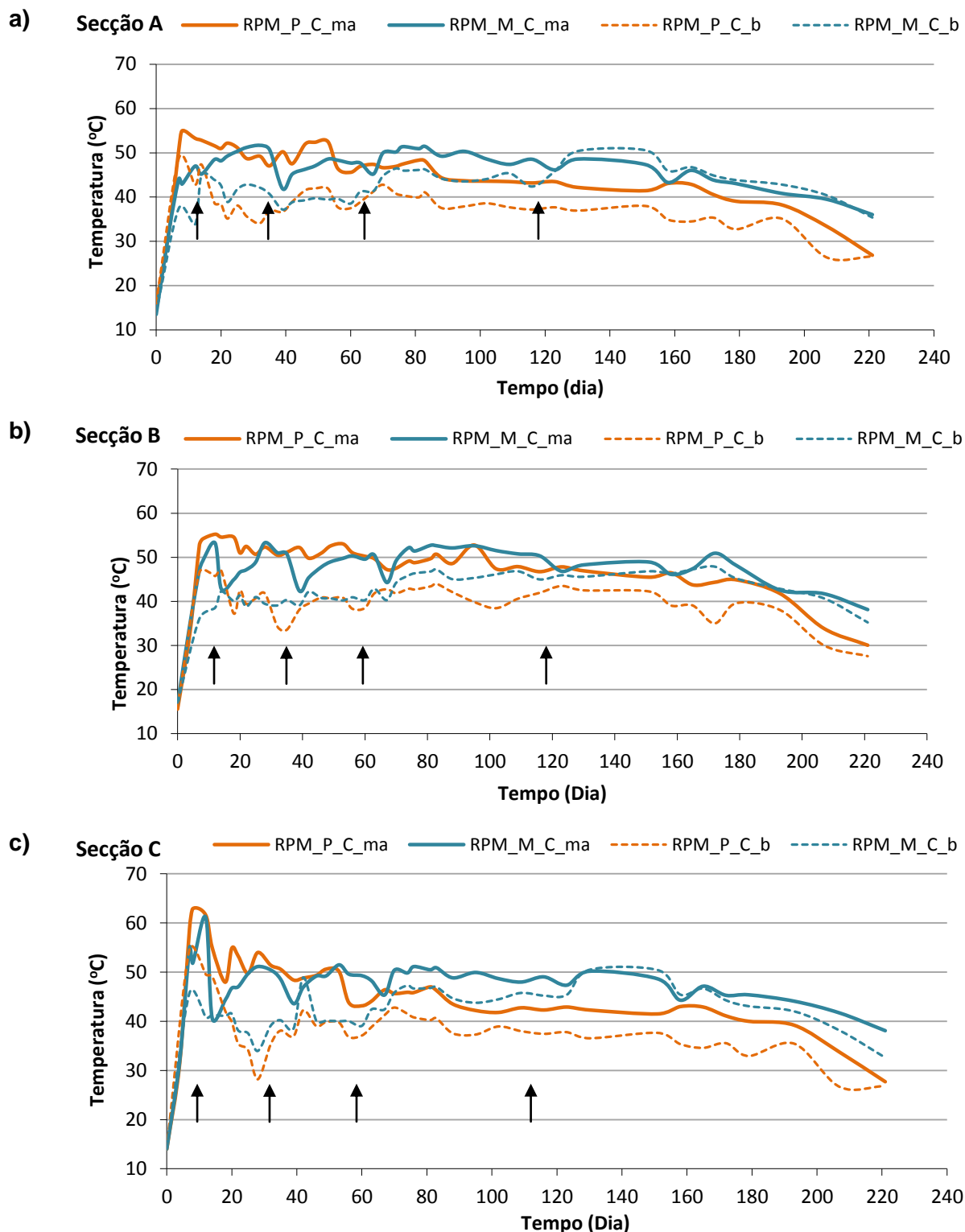
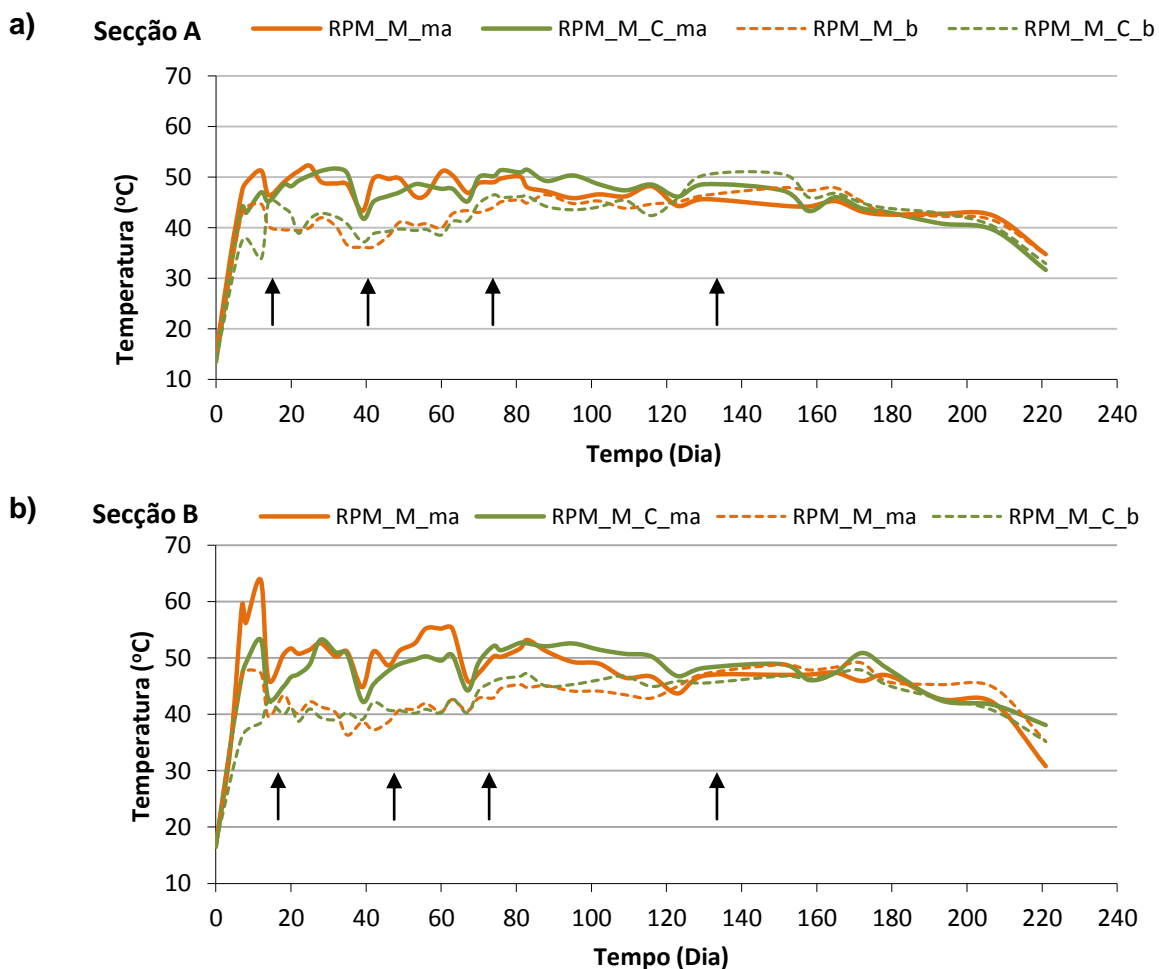


Figura 20 - Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas com diferentes tipos de arejamento, com RPM e cobertura (RPM_P_C e RPM_M_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b - linhas descontínuas).

• COBERTURA

Apenas estão representadas as temperaturas atingidas pelas pilhas com RPM como agente de porosidade, **Figura 21 (a), (b) e (c)**, uma vez que as modalidades de pilhas com casca como agente de porosidade encontravam-se todas elas com cobertura.

Não se observam diferenças significativas entre as pilhas sem e com cobertura. As temperaturas medidas a meia altura da pilha apresentam a mesma tendência de evolução, em qualquer uma das zonas monitorizadas. Em todas elas a temperaturas aumentam ao fim de uma semana decorrida desde o arranque do processo de compostagem, diminuindo até ao último dia de monitorização do processo.



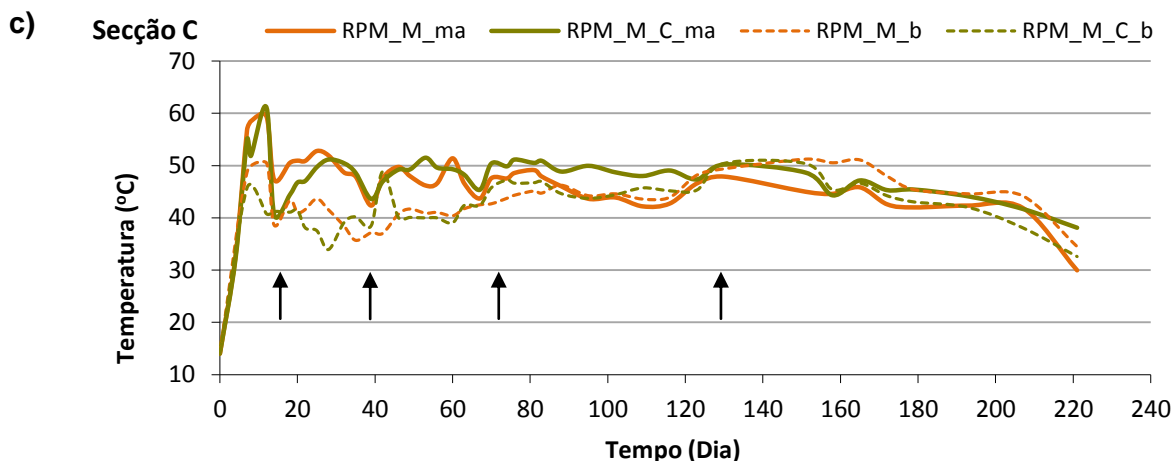


Figura 21 – Evolução da temperatura ao longo do tempo nas secções A (a), B (b) e C (c) nas pilhas sem ou com cobertura, com RPM e arejamento mecânico (RPM_M e RPM_M_C). As figuras ilustram as temperaturas alcançadas a meia altura (ma - linhas contínuas) e na base (b – linhas descontínuas).

3.3.2.2. HUMIDADE

A análise da evolução da humidade ao longo do tempo segue a mesma linha de análise anterior, da evolução da temperatura:

- **CASCA VS RPM**

A **Figura 22** representa a evolução da humidade nas pilhas com diferentes agentes de porosidade, observando-se que em todas as modalidades de pilhas independentemente do agente de porosidade, existe uma nítida tendência para a diminuição do valor de humidade com o decorrer do processo, como já era esperado. De uma forma contraditória ao observado na evolução da temperatura, verifica-se que as pilhas com casca apresentam valores ligeiramente superiores àqueles atingidos pelas modalidades de pilhas com RPM como agente de porosidade. De igual modo, as maiores perdas de humidade ao fim de uma semana decorrida desde o arranque do processo de compostagem ocorreram nas últimas pilhas mencionadas, nas pilhas com RPM. No início do processo, a humidade de todas as modalidades de pilhas é muito semelhante, aproximadamente 65% e 64% para as pilhas com casca e RPM respectivamente.

Numa análise global da evolução do processo, para qualquer tipo de pilha, observa-se uma redução acentuada dos valores iniciais de humidade nos dois primeiros meses de compostagem. Observa-se que a partir deste segundo mês há uma tendência de inibição do processo, com a estabilização do teor de humidade em valores baixos, por volta de

40%. Esta inibição é justificada pelo facto das pilhas não terem sido molhadas, como é aconselhável quando os teores de humidade atingem valores baixos. Neste trabalho prático tal operação não aconteceu, uma vez que o objetivo principal a alcançar com a estabilização de resíduos era a produção de um corretivo agrícola com boas características fertilizantes no menor tempo possível, de modo a diminuir os custos operacionais associados à sua incorporação no solo e isso verificou-se ao fim de 35 dias de estabilização, razão essa que justifica o facto de as pilhas não terem sido molhadas dois meses após o início do processo.

A continuação do processo permitiu verificar o comportamento destes resíduos quando sujeitos a degradação biológica. Observa-se uma degradação lenta devido à presença da casca ou do RPM, que são resíduos resistentes à decomposição pois são ricos em lenhina e outros compostos fenólicos (taninos e outros fito-tóxicos) que aumentam a sua resistência aos ataques microbiológicos.

Na **Figura 22** estão representadas todas as modalidades de pilhas testadas, fazendo com que a análise da tendência de inibição e continuidade do processo se estenda e observe nas análises posteriores, por tipo de arejamento, **Figura 23** e **Figura 24**, e cobertura, **Figura 25**.

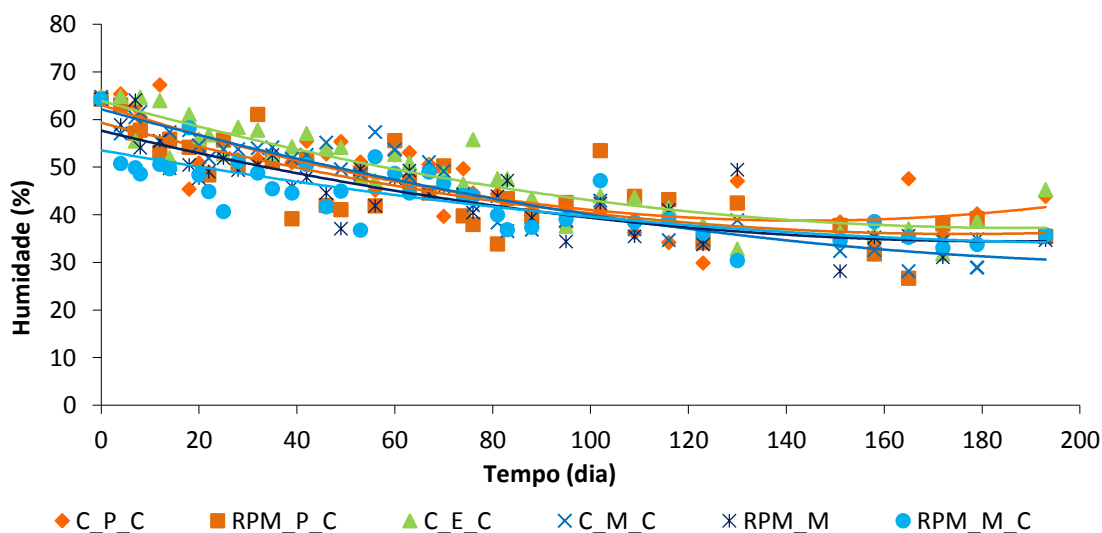


Figura 22 – Evolução da humidade ao longo do tempo nas pilhas com diferentes tipos agente de porosidade (C_P_C, RPM_P_C, C_E_C, C_M_C, RPM_M e RPM_M_C). Os pontos representados são medições discretas da humidade, sendo que as linhas contínuas representam a sua evolução ao longo do processo.

• TIPO DE AREJAMENTO

Uma análise das **Figura 23** e **Figura 24**, observa-se que não existem diferenças significativas entre as modalidades testadas, relativamente ao tipo de arejamento. Todas as pilhas apresentam a mesma tendência que se traduz numa diminuição dos valores de humidade com o decorrer do processo de compostagem. Este processo iniciou-se com uma humidade inicial de aproximadamente 65%, observando-se os valores mais baixos nas pilhas com arejamento mecânico. Em sentido oposto, ou seja, os valores de humidade mais elevados observam-se na pilha estática em que a casca era o agente de porosidade mas estes valores são próximos dos monitorizados para a pilha com o mesmo agente de porosidade e com arejamento mecânico.

De um modo geral, e de forma idêntica à análise feita à evolução da humidade entre pilhas com casca e RPM, observa-se uma diminuição acentuada dos valores de humidade nos dois primeiros meses de compostagem.

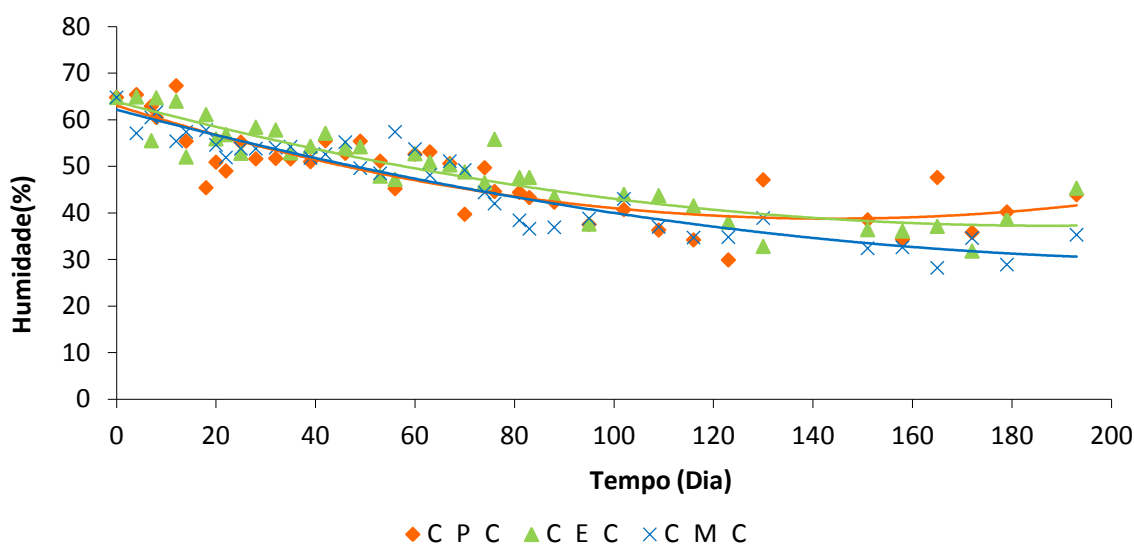


Figura 23 – Evolução da humidade ao longo do tempo nas pilhas com casca e diferentes tipos de arejamento (C_P_C, C_E_C e C_M_C). Os pontos representados são medições discretas da humidade, sendo que as linhas contínuas representam a sua evolução ao longo do processo.

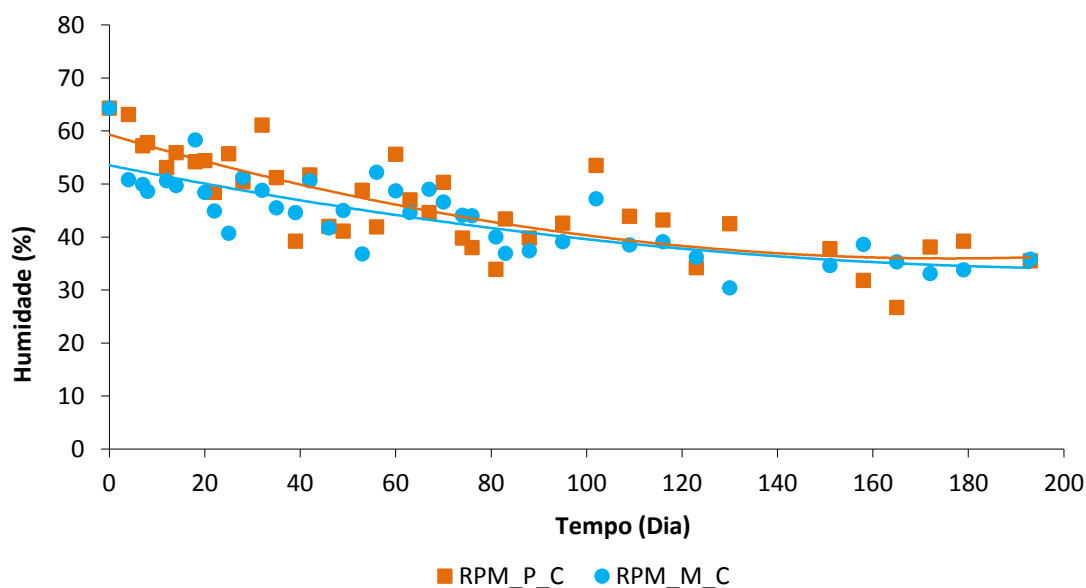


Figura 24 – Evolução da humidade ao longo do tempo nas pilhas com RPM e diferentes tipos de arejamento (RPM_P_C e RPM_M_C). Os pontos representados são medições discretas da humidade, sendo que as linhas contínuas representam a sua evolução ao longo do processo.

• COBERTURA

Na **Figura 25** não se observam variações significativas entre as diferentes modalidades de pilhas de compostagem. O processo iniciou com uma humidade semelhante entre as duas pilhas, aproximadamente 64%. Ao fim de uma semana decorrida desde o arranque do processo de compostagem, as maiores perdas de humidade ocorreram na pilha com cobertura. Existe uma redução acentuada de humidade nos dois primeiros meses de compostagem, variando de acordo com a precipitação registada para o mesmo período.

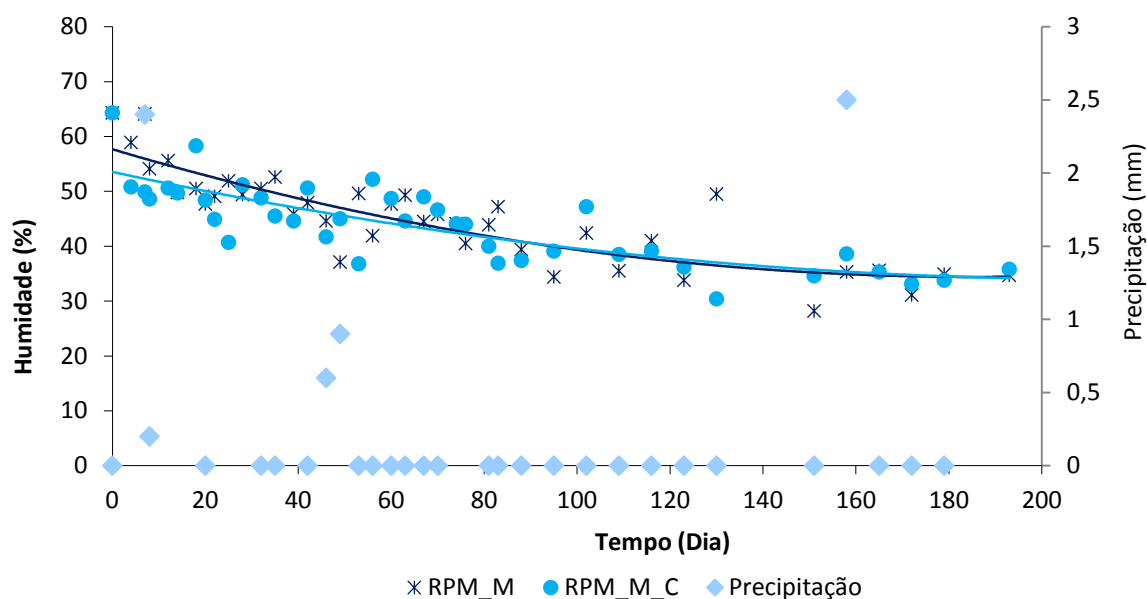


Figura 25 – Evolução da humidade ao longo do tempo nas pilhas com RPM, sem e com cobertura (RPM_M e RPM_M_C). Os pontos representados são medições discretas da humidade, sendo que as linhas contínuas representam a sua evolução ao longo do processo.

3.3.2.3. PH

As linhas apresentadas para a evolução do pH ao longo do tempo, **Figura 26**, nas diferentes pilhas não têm significado físico, elas apenas unem pontos discretos das monitorizações realizadas durante todo o processo, equidistantes em 2, 3 dias. A exposição da evolução do pH em linhas contínuas facilita a sua análise.

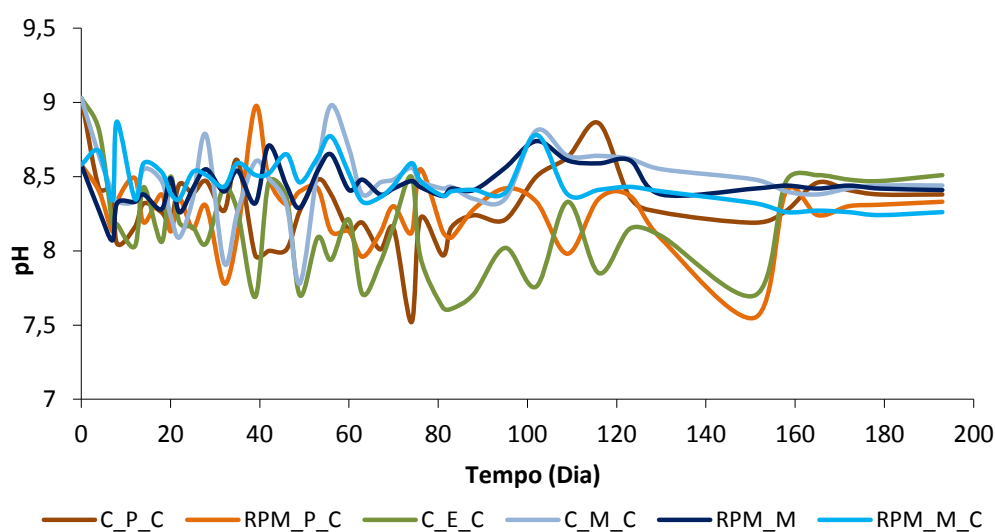


Figura 26 – Evolução do pH ao longo do tempo para as diferentes pilhas.

Os valores de pH no início do processo são muito próximos. Da figura anterior, observa-se uma grande variação de pH, mantendo-se sempre entre 7,5 e 9. Apenas há a referenciar para este parâmetro que os valores registados são coerentes com um bom desenvolvimento do processo (5,8 a 8).

3.3.2.4. SUMÁRIO DOS RESULTADOS

A principal conclusão dos ensaios realizados com as diferentes modalidades de pilhas de compostagem, é o facto de não existirem diferenças significativas entre elas, não se verificando que exista uma modalidade com desempenho claramente superior às restantes.

Na **Figura 27** pode-se observar e comparar o aspeto da pilha RPM_P_C no dia de arranque do processo **(a)** e ao fim de 7 meses **(b)**.

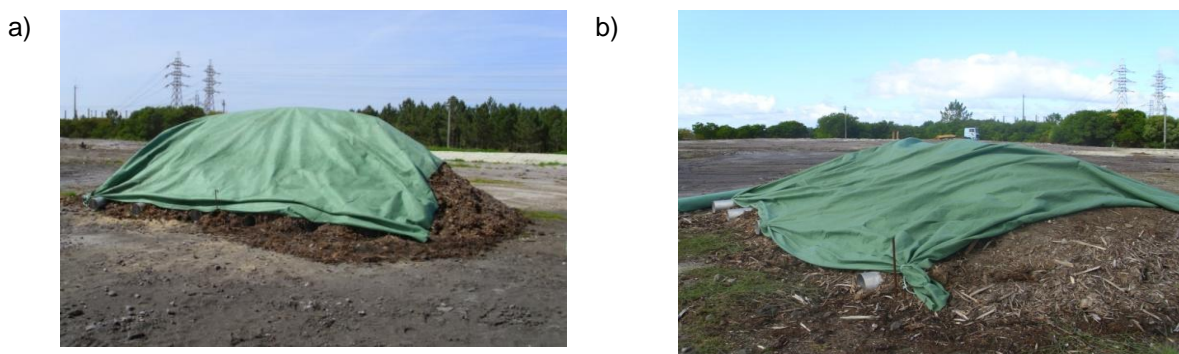


Figura 27- Fotografias da pilha RPM_P_C no dia de arranque do processo **(a)**, e da mesma pilha ao fim de 7 meses do início do processo de compostagem **(b)**.

Para o parâmetro de monitorização *temperatura*, verificou-se que em todas as modalidades ocorreu um longo período com temperaturas elevadas (acima de 45°C), aproximadamente seis meses. Este longo período ocorreu possivelmente devido à continuação da compostagem dos materiais com elevado teor de carbono, como é o caso da casca e do RPM, cuja função é essencialmente de agente de porosidade. A continuidade da compostagem deve-se à diferença granulométrica entre materiais, fazendo com que as porções de casca grosseiramente moída e RPM continuem a degradar-se ao longo do tempo, em pontos localizados na pilha, com elevadas razões C:N.

Para os outros dois parâmetros de monitorização, *humidade* e *pH*, observou-se que as variações foram idênticas entre todas as modalidades de pilhas de compostagem.

Deste modo, a seleção da modalidade de pilha a adotar será aquela que apresentar menor custo inerente a cada uma. Tendo isto, a escolha passará por:

- Tipo de arejamento: estático;
- Cobertura: no período avaliado não se justifica a utilização de cobertura, mas poderá ser justificado em períodos de grande pluviosidade;
- Agente de porosidade: RPM.

O agente de porosidade selecionado foi o RPM mas pode ser outro tipo de resíduo desde que apresente boas características para trabalhar como agente de porosidade e que se encontre disponível nas unidades fabris. Qualquer que seja o agente de porosidade escolhido, ele poderá ser reutilizado nas construções das pilhas seguintes desde que crivado.

3.3.3. CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA PARA FINS DE HOMOLOGAÇÃO

Com base nas condições que minimizam os custos do processo descritas no ponto anterior, selecionou-se uma das seis pilhas para uma caracterização mais detalhada da evolução do processo. A pilha ideal seria constituída por LP, LB, Cz, RPM, estática e sem cobertura, mas nenhuma das seis modalidades testadas tem esta constituição. Como não existe uma modalidade de pilha estática com RPM, e como os resultados obtidos entre as pilhas estática e a de arejamento passivo são idênticos, optou-se pela pilha RPM_P_C constituída por LP, LB, Cz, RPM, com arejamento passivo e cobertura.

A caracterização detalhada da pilha RPM_P_C envolveu a análise da evolução de alguns parâmetros, em base seca, durante um determinado período de tempo do processo de compostagem, **Figura 28**: frações mássicas de matéria orgânica (Mo), azoto total (N_{total}) e fósforo total (P_{total}), razão C:N, concentração de AOX e poder calorífico inferior (PCI). A escolha dos parâmetros anteriormente descritos é justificada pelo facto desses parâmetros serem bons indicadores do estado de estabilização do produto produzido até então e pela necessidade de determinar, no longo período do processo, o momento para o qual se pode considerar que se atingiu a estabilização da matéria orgânica. Esse momento será designado por tempo ótimo de operação .

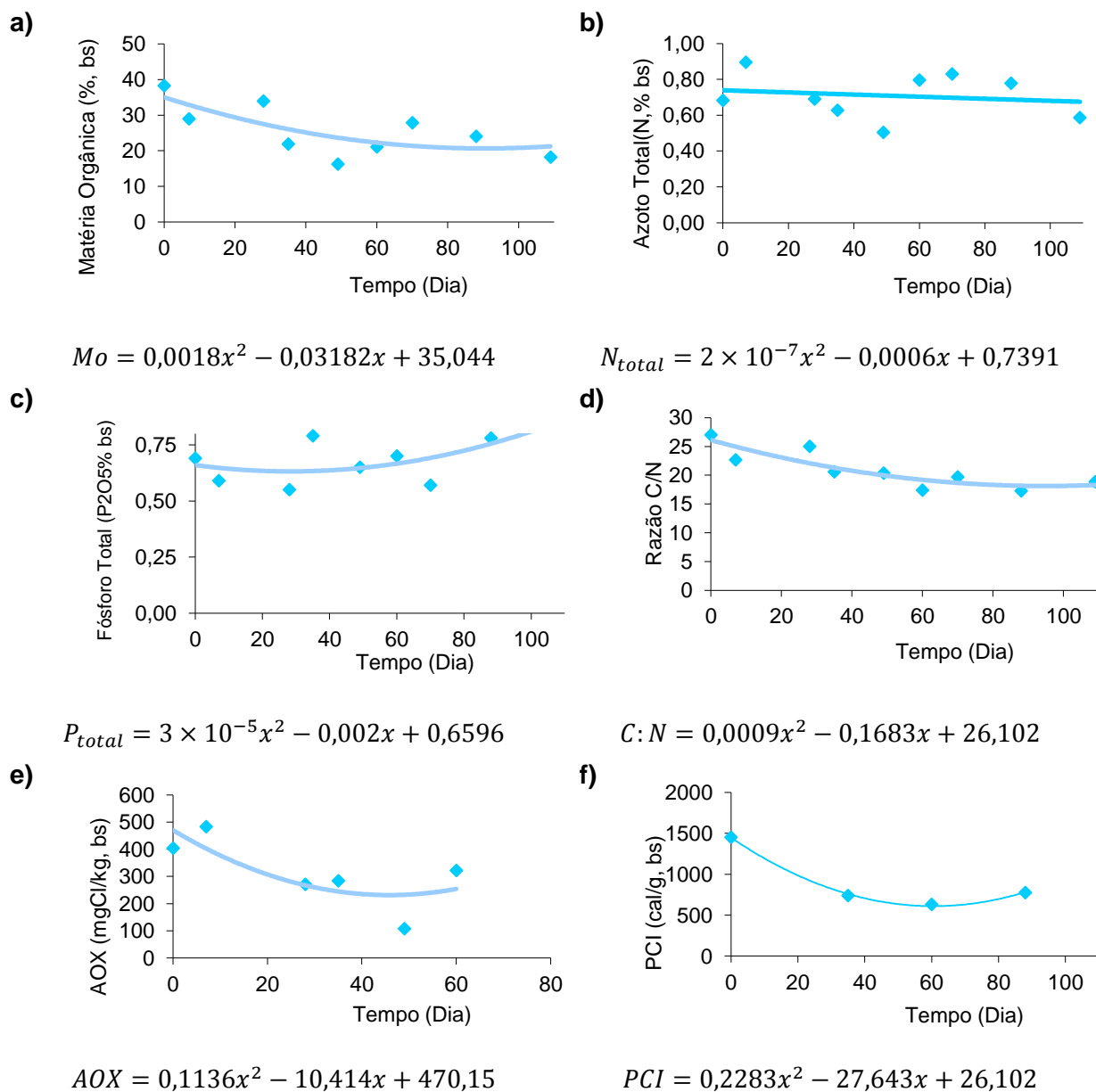


Figura 28 – Evolução das quantidades de matéria orgânica **(a)**, teores de nutrientes: azoto total **(b)** e fósforo **(c)**, razão C:N **(d)**, AOX **(e)** e PCI **(f)** para a pilha RPM_P_C. Os pontos representados são medições discretas dos diversos parâmetros, sendo que as linhas contínuas representam somente ajustes matemáticos relativamente à variável independente x que representa o tempo de operação do processo.

Observando a **Figura 28**, verifica-se que os valores experimentais de Mo , N_{total} e P_{total} traduzem a heterogeneidade da pilha e como consequência a falta de representatividade das amostras. Assim, optou-se por descrever a evolução dos parâmetros ao longo do processo, empiricamente, através de polinómios de ajuste, representados pelas linhas contínuas.

A análise da **Figura 28**, permite observar que:

- A Mo diminui com o decorrer do processo, de 38% para 18%;
- Os teores P_{total} aumentaram com o decorrer do processo, de 2,8% para 3,5%;
- As perdas de N_{total} observadas são idênticas às perdas de matéria orgânica;
- A razão C:N diminui, justificando-se por uma perda maior de carbono em relação ao azoto, de 27 para 19;
- Os níveis de AOX também diminuem com o decorrer do processo, de 404 mgCl/kg para níveis entre 270 e 322 mgCl/kg;
- O PCI diminui ao longo do processo, de acordo com a perda de matéria orgânica, de 1415 cal/g para níveis entre 631 e 775 cal/g.

De forma global, observou-se uma tendência de estabilização aproximadamente 1 a 2 meses após o início do processo, nomeadamente no que diz respeito à matéria orgânica, sendo essa a tendência seguida pelos restantes parâmetros.

3.3.3.1. TEMPO ÓTIMO DE OPERAÇÃO

Observou-se, para qualquer modalidade de pilha, um elevado período de compostagem onde os níveis de temperatura se situaram acima dos 45°C. Esta situação, como já foi referido atrás, deve-se à continuidade de degradação dos compostos de mais difícil biodegradação e presentes, principalmente, no agente de porosidade. Apesar desta continuidade e dos níveis elevados de temperatura, a mistura já apresentava características de material estabilizado, como sugeriu a análise feita à evolução da pilha RPM_P_C.

Por esta razão, foi pertinente definir qual o tempo de duração do processo, designado por tempo ótimo de operação, que permitisse atingir simultaneamente as seguintes condições:

- Obtenção de uma mistura estabilizada;
- Tempo de compostagem mínimo, pois corresponde à minimização da área necessária para se realizar o processo;
- Redução do custo de transporte e operação de espalhamento e aplicação do corretivo agrícola na floresta. Para esta condição, o indicador monitorizado ao longo do processo com maior significado foi a perda de água por massa de mistura estabilizada, **Figura 29**.

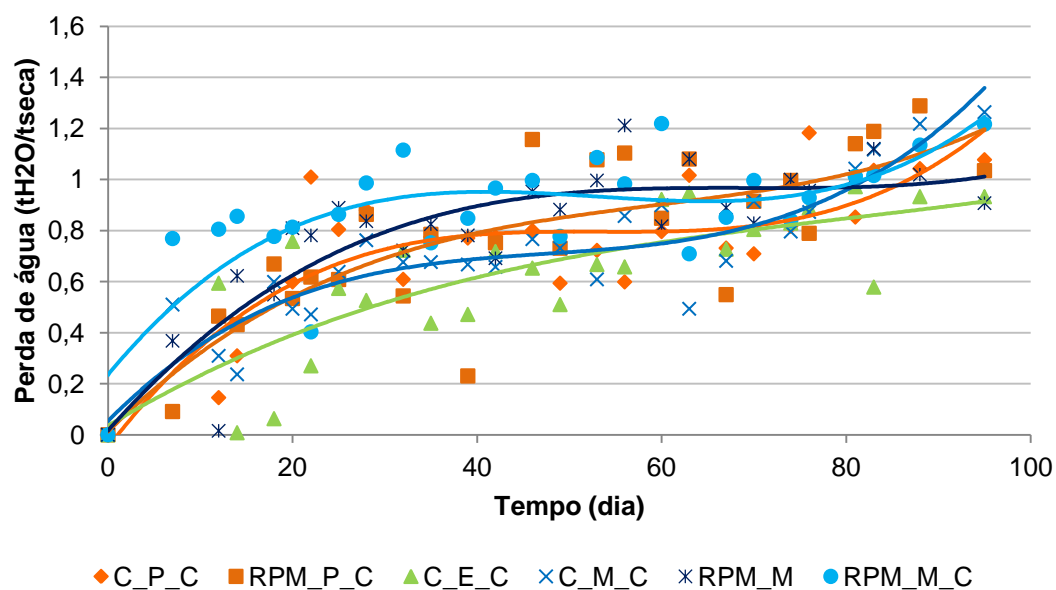


Figura 29 – Evolução da perda de água do processo de compostagem para as diferentes modalidades. Os pontos representados são medições discretas da perda de água, sendo que as linhas contínuas procuram descrever a evolução da perda de água ao longo do processo.

A análise da figura anterior reforça a tendência de estabilização do processo ao fim de 1 a 2 meses como sugeriram a evolução dos parâmetros caracterizados na pilha RPM_P_C, **Figura 28**. Deste modo, seleccionaram-se para caracterização detalhada as amostras recolhidas no 35º dia do processo. Esta caracterização encontra-se resumida na **Tabela 13**.

Uma análise conjunta da **Tabela 13** com as **Tabela 14** e **Tabela 15**, permite verificar que ao final de 35 dias foi possível obter um produto com classe de estabilidade V, *composto muito estável*, de acordo com o teste de Dewar, **Anexo A**. Os produtos obtidos apresentam valores reduzidos de razão C:N, sendo adequados à aplicação no solo, bem como, reduções de cerca de 30% na concentração de AOX, exceto na pilha C_P_C. Os valores de metais, para qualquer modalidade de pilha testada, são inferiores aos valores limite estipulados no DL nº276/2009 e em relação aos agentes microbiológicos, verifica-se que não se detetaram a presença dos mesmos, *Salmonella spp.* e *Escherichia Coli*.

Tabela 13 – Caracterização do material estabilizado para o tempo ótimo de operação, de acordo com diversos parâmetros, fertilizantes e ambientais.

Parâmetro	Tempo/Ponto intermédio					
	C_P_C	RPM_P_C	C_E_C	C_M_C	RPM_M	RPM_M_C
Humidade (% btq)	51,59	50,36	58,44	53,78	49,43	51,23
Matéria orgânica (% bs)	28,74	21,91	39,90	36,06	20,50	28,90
pH	8,5	8,3	8,1	8,8	8,6	8,5
Razão C:N	21	21	20	26	25	24
Hidrogénio (% bs)	1,8	1,6	2,6	2,7	1,4	1,6
Azoto (% bs)	0,8	0,7	1,1	0,9	0,5	0,6
Carbono (% bs)	16	14	22	23	13	14
Enxofre total (S,% bs)	< Lq	< Lq	< Lq	< Lq	< Lq	< Lq
Azoto total (N,mg/kg bs)	7554	6023	12304	7840	4940	6580
Fósforo total (P,mg/kg bs)	7876	7076	6813	6366	6430	8282
Potássio total (K ₂ O,g/kg bs)	24,2	15,8	22,5	18,7	20	26,4
Cálcio total (Ca,g/kg bs)	137	111	126	107	112	133
Magnésio total (Mg,g/kg bs)	8,4	7,2	6,3	7	7,5	8,6
Boro total (B,mg/kg bs)	66	60	54	59	55	67
AOX (mgCl/kg bs)	422	284	293	299	256	288
Salmonela spp.	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Escherichia Coli (NMP/g)	Não detetado	Não detetado	4	Não detetado	2	Não detetado
Teste de Dewar	Classe de estabilidade V – Muito estável. Composto maturado					

Os 35 dias de processo permitiram obter perdas significativas de humidade, 1 kgH₂O/kgm_{seca inicial} e reduzir a massa seca, 0,21kg/ kgm_{seca inicial}, na pilha RPM_P_C, **Tabela 14.**

Tabela 14 – Perda de matéria seca e de água.

		C_P_C	RPM_P_C	C_E_C	C_M_C	RPM_M	RPM_M_C
Início	TH (% btq)	64,8	64,3	64,8	64,8	64,3	64,3
	R _{Hi} (kg H ₂ O/kgm _{seca})	1,84	1,80	1,84	1,84	1,80	1,80
	Moi (% bs)	42,3	38,3	42,3	42,3	38,3	38,3
35º dia	TH (% btq)	51,6	50,4	58,4	53,8	49,4	51,2
	R _{Hf} (kg H ₂ O/kgc _{seco})	1,07	1,01	1,41	1,16	0,98	1,05
	Mof (% bs)	28,7	21,9	39,9	36,1	20,5	28,9
R _{seco} (kg c _{seco} /kg bs)		0,810	0,790	0,960	0,902	0,776	0,868
P _{ms} (kg/kg bs)		0,190	0,210	0,040	0,098	0,224	0,132
P _{H2O} (kg H ₂ O/kg bs)		0,98	1,00	0,49	0,79	1,04	0,89

O rendimento seco, R_{seco} , foi determinado no pressuposto de que a massa de inertes se mantém constante durante o processo e com base nos teores de matéria orgânica inicial, Moi e matéria orgânica final, Mof , pela **Eq. 1**:

$$R_{seco} \left(\frac{kgc_{seco}}{kg bs} \right) = \frac{1 - (Moi (\%) / 100)}{1 - (Mof (\%) / 100)} \quad \text{Eq. 1}$$

A perda de matéria seca, P_{ms} , por sua vez, foi determinada tendo em conta o rendimento seco:

$$P_{ms} \left(\frac{kg}{kg bs} \right) = 1 - R_{seco} \left(\frac{kgc_{seco}}{kg bs} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

Por fim, a perda de água, P_{H2O} , foi determinada pela seguinte equação:

$$P_{H2O} \left(\frac{kg_{H2O}}{kg bs} \right) = R_{Hi} - R_{seco} \times R_{Hf} \quad \text{Eq. 3}$$

Desta análise ainda é possível verificar que as pilhas com casca tendem a apresentar níveis superiores de matéria orgânica e azoto, enquanto que as pilhas com RPM apresentam maiores perdas de humidade. As diferentes modalidades testadas não contribuíram para diferenças significativas de composição, dentro do mesmo agente de porosidade. Relativamente à classe de resíduos existentes, verificou-se que os valores



obtidos de metais classificam as amostras na Classe II, segundo o trabalho “Biological Treatment of Biowaste - 2nd Draft” (DG. Env. A.2, 2001), e Classe II ou Classe II A segundo a “Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto” (2005). O único parâmetro que impede a sua classificação como classe I (nível mais exigente) é o cádmio.

O principal resultado da experiência de compostagem foi verificar que ao final de 35 dias de degradação foi possível obter misturas estabilizadas com boas características fertilizantes candidatas à homologação de acordo com a Portaria nº1322/2006, caso seja obtida, permitirá dispor de uma solução válida e operacionalmente melhorada para a gestão dos resíduos em causa que tem condições para substituir a atual aplicação de resíduos em floresta.



Tabela 15 - Valores máximos admissíveis de metais pesados, para o DL nº 276/2009, relativo às lamas destinadas à aplicação no solo agrícola, e para as diferentes classes de composto do 2nd Draft (DG Env. A.2, 2001) e da Proposta de Norma Técnica (2005).

Parâmetro	Tempo intermédio						2 nd Draft (DG Env. A. 2, 2001)			Proposta de Norma Técnica (2005)				Valores Limite (DL276/2009)
	C_P_C	RPM_P_C	C_E_C	C_M_C	RPM_M	RPM_M_C	Classe 1	Classe 2	Resíduo Biodegradável Estabilizado	Classe I	Classe II	Classe II A	Classe III	
Cádmio Total (Cd,mg/kg)	1,1	1,6	0,9	1,1	1,3	1,0	0,7	1,5	5	0,7	1,5	3	5,0	20
Crómio Total (Cr,mg/kg)	27,5	22,1	22,4	19,1	25,0	23,1	100	150	600	100	150	300	400	1000
Cobre Total (Cu,mg/kg)	128	141	40	42	44	22	100	150	600	100	150	300	400	1000
Mercúrio Total (Hg,mg/kg)	0,081	0,077	0,083	0,123	0,044	0,130	0,5	1	5	0,7	1,5	3	5,0	16
Níquel Total (Ni,mg/kg)	19	16	12	13	20	14	50	75	150	50	100	200	200	300
Chumbo Total (Pb,mg/kg)	19	19	14	13	14	12	100	150	500	100	150	300	500	750
Zinco Total (Zn,mg/kg)	125	124	60	60	55	44	200	400	1500	200	500	1000	1500	2500
AOX (mgCl/kg)	422	284	293	299	256	288	-	-	-			500		-

4. PROJETO DE GESTÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DA PASTA E DO PAPEL

O projeto de gestão de resíduos da IPP englobou as três fábricas do gPS. Para a realização do projeto de gestão foi necessário recolher informação dos quantitativos de resíduos produzidos, produções de pasta e/ou papel em cada unidade fabril do gPS. A execução deste projeto baseou-se no trabalho prático desenvolvido para a unidade fabril da Figueira da Foz e anteriormente apresentado. De forma análoga para as três unidades fabris, determinou-se qual a quantidade de produto produzido, a quantidade de resíduos escoados, a área necessária para a operação de compostagem, os custos operacionais, estando apenas representados graficamente a realidade da unidade fabril da Figueira da Foz, dimensionaram-se os parques de compostagem e analisaram-se os investimentos necessários à aplicação desta solução de valorização de misturas de resíduos, compostagem.

4.1. QUANTITATIVOS DE RESÍDUOS

Na **Tabela 16** estão representados os quantitativos médios anuais de resíduos produzidos em cada unidade fabril do gPS e que são encaminhados para incorporação no solo.

Tabela 16 – Quantitativos de resíduos.

Resíduos		Fábricas		
		Cacia	Figueira da Foz	Setúbal
Lamas mistas	tbtq/ano	25367	-	60000
	kgs/tAD	30	-	31
Cinzas	tbtq/ano	19813	5940	45254
	kgs/tAD	69	11	82
LP	tbtq/ano	-	15895	-
	kgs/tAD	-	5	-
LB	tbtq/ano	-	29095	-
	kgs/tAD	-	8	-
Agente de porosidade	tbtq/ano	1685	1714	3985
Produção de pasta	tAD/ano	287 026	531 620	548 810

Nota: tAD é uma unidade funcional da indústria da pasta e do papel. Significa tonelada absolutamente seca, “absolutely dry”.

O valor apresentado para o agente de porosidade representa a necessidade deste resíduo para o processo, ou seja, foi calculada qual seria a massa de agente de porosidade necessária para o processo de compostagem tendo em conta os quantitativos e proporções dos restantes resíduos na mistura, **Tabela 6**. Como já foi referido anteriormente, **secção 3.3.3**, o agente de porosidade poderá ser reutilizado na construção das pilhas, portanto no cálculo da necessidade deste resíduo foi tido em conta uma percentagem de perdas de 20% incluindo degradação, considerando 35 dias de compostagem.

Uma análise à tabela anterior mostra diferenças significativas nos específicos de produção de resíduos. Fábricas com produções idênticas de pasta, como são o caso da unidade fabril da Figueira da Foz e de Setúbal, apresentam produções de resíduos bastantes diferentes. Todas estas diferenças são justificadas:

- No caso dos específicos de produção de lamas, observa-se que as unidades fabris de Cacia e Setúbal têm valores muito próximos, cerca de 30kgbs/tAD, e que a unidade fabril da Figueira da Foz apenas tem cerca de 16kgbs/tAD. Estas diferenças existem uma vez que:
 - o Em Cacia na quantificação deste resíduo há uma contribuição significativa de lamas de cal, estando a serem quantificadas juntamente com as LB. A razão pela saída de lamas de cal juntamente com as LB, deve-se ao facto destas serem encaminhadas para o tratamento de efluentes uma vez que o forno de cal não tem capacidade para tratar a quantidade total de lamas de cal;
 - o Em Setúbal existe uma grande produção de LP devido à introdução da nova máquina de papel;
- No caso dos específicos de produção de cinzas, observa-se, mais uma vez, que as unidades fabris de Cacia e Setúbal têm valores mais elevados, cerca de 69kgbs/tAD e 82kgbs/tAD respectivamente, que a unidade fabril da Figueira da Foz, cerca de 11kgbs/tAD. Estas diferenças existem uma vez que:
 - o Nas unidades fabris de Cacia e Setúbal existem duas caldeiras, uma caldeira auxiliar, a casca, que produz energia para consumo próprio e uma Central termoelétrica, a biomassa, que produz energia elétrica para o exterior.
 - o Na unidade da Figueira da Foz apenas existe uma Caldeira auxiliar.

4.2. QUANTIDADE DE PRODUTO PRODUZIDO

A quantidade de material estabilizado pode ser estimada para as três unidades fabris com base na perda de massa total verificada nos ensaios realizados. Para tal, apresenta-se o cálculo do fator de perda de massa total, f , tendo por base: i) o pressuposto de que a massa de inertes se mantém constante ao longo do processo e ii) a análise de teor de humidade btq, TH_{real} e teor em matéria orgânica bs, Mo .

A massa seca presente em cada instante, $M_{seca\ presente}$, na pilha, pode ser estimada no pressuposto de que a massa de cinza do sistema se mantém constante, através da **Eq.4**:

$$M_{seca\ presente}(kg) = \frac{M_{seca\ inicial}(1 - Mo_i/100)}{(1 - Mo_{presente}/100)} \quad \text{Eq. 4}$$

A **Figura 30** representa os resultados da massa seca calculados pela **Eq.4** com base nos valores experimentais, bem como, o traçado de uma linha de tendência que permite prever valores para a massa seca, $M_{seca\ prevista}$, em qualquer momento, calculados pela **Eq.5** de ajuste matemático, em que a variável independente, x , representa o tempo de operação em dia.

$$M_{seca\ prevista}(kg) = -0,00007x^3 + 0,0138x^2 - 0,8584x + 97,79 \quad \text{Eq. 5}$$

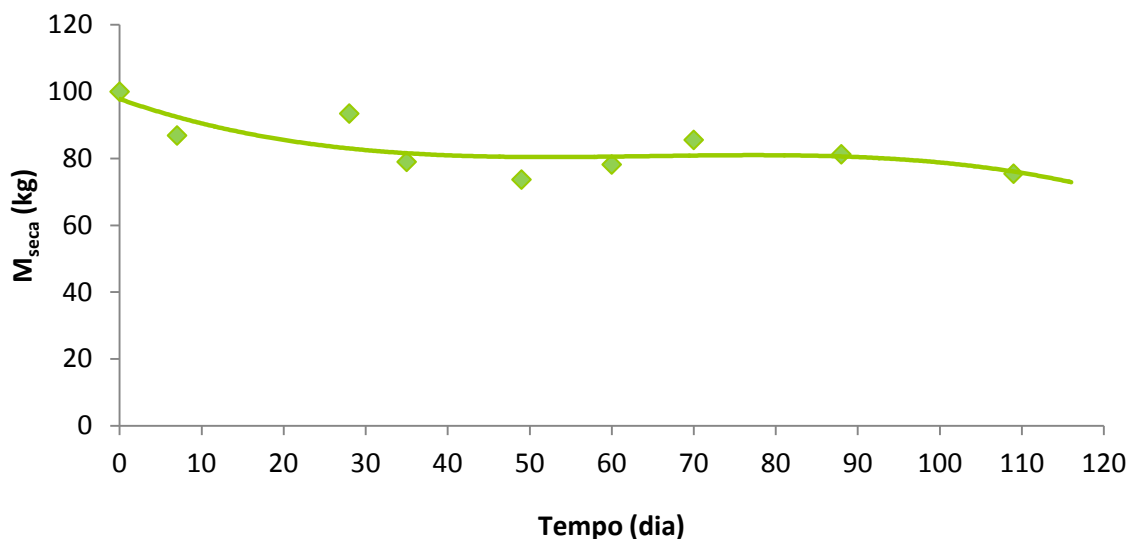


Figura 30 - Evolução da matéria seca no decorrer do processo de compostagem.

A **Figura 31** representa os resultados experimentais do teor de humidade, TH_{reais} e o traçado de uma linha de tendência que permite prever valores para o teor de humidade,

$TH_{previsto}$, em qualquer momento, calculados pela **Eq.6** de ajuste matemático, em que a variável independente, x , representa o tempo de operação em dia.

$$TH_{previsto}(\%) = -0,00002x^3 + 0,0057x^2 - 0,5951x + 65,196 \quad \text{Eq. 6}$$

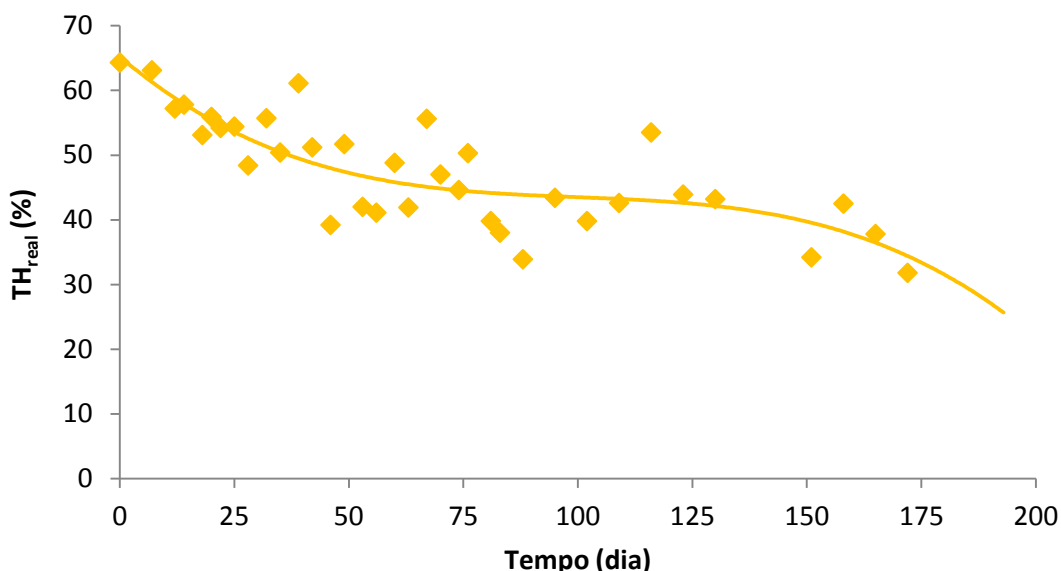


Figura 31 - Evolução do teor de humidade no decorrer do processo de compostagem.

A determinação da massa total presente ao longo do processo, $M_{presente}$, é calculada pela **Eq.7**:

$$M_{presente}(kg) = \frac{M_{seca\ prevista}(kg)}{1 - \frac{TH_{previsto}(\%)}{100}} \quad \text{Eq.7}$$

O fator de perda de massa total, f , pode ser calculado com base nos dados experimentais de perda de água, P_{H_2O} , perda de matéria seca, P_{ms} e razão de humidade inicial, R_{Hi} , presentes na **Tabela 14**, pela **Eq.8**, ou com base nos valores estimados de massa total presente, $M_{presente}$, pela **Eq.9** e evoluções da matéria seca e teor de humidade no decorrer do processo descritas nas **Figuras 30 e 31**:

$$f = \frac{P_{ms} + P_{H_2O}}{1 + R_{Hi}} \quad \text{Eq.8}$$

$$f = \frac{M_{inicial} - M_{presente}}{M_{inicial}} \quad \text{Eq. 9}$$

A estabilização de misturas de resíduos por compostagem, com a composição utilizada nos ensaios, permite uma produção final de corretivo agrícola, no tempo de estabilização correspondente ao ponto ótimo do processo de:

- 18380 tbtq/ano na Unidade Fabril de Cacia,
- 18672 tbtq/ano na Unidade Fabril da Figueira da Foz,
- 43474 tbtq/ano na Unidade Fabril de Setúbal.

Estas quantidades de produção de composto reduzem em cerca de 40% a massa anual de resíduos encaminhados para aplicação florestal relativamente à aplicação dos mesmos materiais não estabilizados, reduzindo assim os custos operacionais de transporte e aplicação.

4.3. QUANTIDADE DE RESÍDUOS ESCOADOS

Na determinação da quantidade de resíduos escoados, o valor apresentado para o agente de porosidade representa a necessidade deste resíduo para o desenvolvimento do processo.

– UNIDADE FABRIL DE CACIA, PORTUCEL CACIA

Em termos de escoamento de resíduos, **Tabela 17**, verificou-se que a composição utilizada nos ensaios permite um escoamento aceitável dos mesmos. O escoamento total de lamas mistas (componente limitante), mistura de LP e LB, permitirá escoar 30% das cinzas produzidas.

Tabela 17 - Previsão de escoamento de resíduos da Portucel utilizando-se a compostagem dos mesmos.

Resíduos	Produção anual (tbtq/ano)	Produção diária (tbtq/d)	Relação de produção	Relação de mistura	Necessidade para compostagem (tbtq/d)
Lamas mistas	25367	72	1,28	4,3	72
Cz	19813	57	1,00	1,0	17
Agente de porosidade	1685	5		1,4	24

– UNIDADE FABRIL DA FIGUEIRA DA FOZ, SOPORCEL

Em termos de escoamento de resíduos, **Tabela 18**, verificou-se que a composição utilizada nos ensaios permite um escoamento equilibrado dos mesmos, exceto para as lamas biológicas. O escoamento total das cinzas (componente limitante) permitirá escoar:

- 83% de lamas primárias;



- 43% de lamas biológicas;
- Esgota a produção de RPM, apenas no caso de este não ser reutilizado como agente de porosidade após crivagem.

Tabela 18 - Previsão de escoamento de resíduos da Soporcel utilizando-se a compostagem dos mesmos.

Resíduos	Produção anual (tbtq/ano)	Produção diária (tbtq/d)	Relação de produção	Relação de mistura	Necessidade para compostagem (tbtq/d)
LP	15895	45	2,7	2,2	38
LB	29095	83	4,9	2,1	36
Cz	5940	17	1,0	1,0	17
Agente de porosidade	1714	5		1,4	24

– UNIDADE FABRIL DE SETÚBAL, PORTUCEL SETÚBAL

Em termos de escoamento de resíduos, **Tabela 19**, verificou-se que a composição utilizada nos ensaios permite um escoamento aceitável dos mesmos. O escoamento total de lamas mistas (componente limitante), mistura de LP e LB, permitirá escoar 31% das cinzas produzidas.

Tabela 19 - Previsão de escoamento de resíduos da Portucel Setúbal utilizando-se a compostagem dos mesmos.

Resíduos	Produção anual (tbtq/ano)	Produção diária (tbtq/d)	Relação de produção	Relação de mistura	Necessidade para compostagem (tbtq/d)
Lamas mistas	60000	171	1,33	4	171
Cz	45254	129	1,0	1	40
Agente de porosidade	3985	11		1	57

4.4. AVALIAÇÃO DE CUSTOS

Para a avaliação total de custos é necessário contabilizar os custos fixos relacionados com a preparação do terreno (demolições, movimentação de terra, geomenbrana, camadas de betão, valetas, etc) e com os custos operacionais inerentes ao processo (mistura de resíduos, transporte e espalhamento da mistura, etc).

4.4.1. DETERMINAÇÃO DA ÁREA NECESSÁRIA PARA A OPERAÇÃO DE COMPOSTAGEM

Para a determinação da área necessária para compostagem (área de pilhas) considerou-se que as futuras pilhas teriam as dimensões presentes na bibliografia da especialidade e descritas na **Figura 32**:

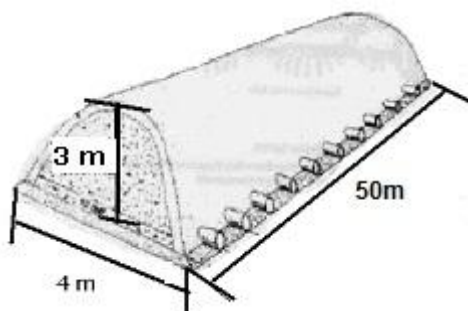


Figura 32 - Dimensões das futuras pilhas de compostagem.

O cálculo da área necessária para a construção das pilhas, A_{pilhas} teve por base a quantidade diária de resíduos disponível para compostagem, Q_r – **Tabelas 17 a 19**, e a massa específica, D_m , da mistura de resíduos, tipicamente $0,80 \text{ tbtq/m}^3$. Em primeiro lugar determinou-se qual seria o comprimento total de pilha, L_{pilha} , necessário para acomodar todo o volume diário da mistura de resíduos, V_{dm} , para pilha com secção $A_{\Delta}=6 \text{ m}^2$, de acordo com **Eq.s 10 e 11**:

$$V_{dm}(\text{m}^3/\text{dia}) = \frac{Q_r(\text{tbtq}/\text{dia})}{D_m(\text{tbtq}/\text{m}^3)} \quad \text{Eq. 10}$$

$$L_{pilha}(\text{m}) = \frac{V_{dm}(\text{m}^3/\text{dia})t(\text{dia})}{A_{\Delta}(\text{m}^2)} \quad \text{Eq. 11}$$

De seguida determinou-se qual seria o número de pilhas necessário, com comprimento unitário de 50m, ver **Figura 32**, pela **Eq.12**:

$$N_{pilhas}^o = \frac{L_{pilha}(\text{m})}{50(\text{m})} \quad \text{Eq. 12}$$

A largura necessária, $l_{nec.}$, para a construção do número total de pilhas para os 35 dias de compostagem, é dada pela **Eq.13**, que tem em conta o espaço necessário à movimentação de máquinas mais um espaço de uma pilha extra para revolvimento.

$$l_{nec.}(\text{m}) = 4 \times (2 \times N_{pilhas}^o + 1) \quad \text{Eq. 13}$$

Por fim, calculou-se qual seria a área de toda a zona de compostagem, pela **Eq.14**:

$$A_{compostagem}(m^2) = l_{nec.}(m) \times 50 (m) \quad \text{Eq. 14}$$

A condensação das **Equações 10 a 14** resultam numa única equação, **Eq. 15**, para a área de compostagem em função do tempo, t , em dias de processamento.

$$A_{compostagem}(m^2) = 400 \times \gamma(0,47 \times t) + 200 \quad \text{Eq. 15}$$

Em que γ é a função matemática de Arredondamento por excesso preciso.

Apresenta-se nas **Tabelas 20, 21 e 23**, os cálculos das áreas de compostagem para cada unidade fabril do gPS. A relação entre a área de compostagem necessária e o tempo de processamento é ilustrada nas **Figuras 31, 32 e 33**, verificando-se para a unidade fabril de Setúbal que essa relação assume um valor maior para o declive da reta de regressão. As retas de regressão apresentadas nas **Figuras 31, 32 e 33**, são úteis para o cálculo dos custos apresentados na secção seguinte, **secção 4.4.2**.

– UNIDADE FABRIL DE CACIA, PORTUCEL CACIA

Tabela 20 – Cálculo da área necessária para compostagem com o decorrer do processo.

$t (d)$	$V_{dm} (m^3)$	$L_{pilha} (m)$	$A_{base} (m^2)$	N°_{filas}		$l_{nec.} (m)$	$A_{compostagem} (m^2)$
1	142	24	94	0,5	1	12	600
5	708	118	472	2,4	3	28	1400
10	1416	236	944	4,7	5	44	2200
20	2831	472	1888	9,4	10	84	4200
35	4955	826	3303	16,5	17	140	7000
40	5663	944	3775	18,9	19	156	7800
50	7079	1180	4719	23,6	24	196	9800
60	8494	1416	5663	28,3	29	236	11800
88	12458	2076	8306	41,5	42	340	17000

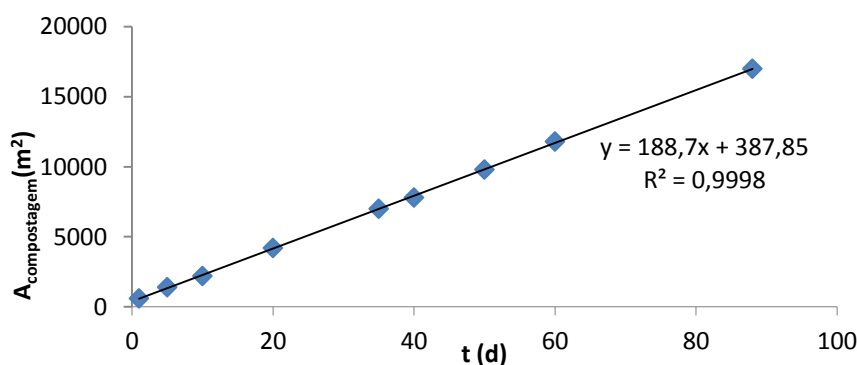


Figura 33- Evolução da área com o tempo para a unidade fabril de Cacia.

– UNIDADE FABRIL DA FIGUEIRA DA FOZ, SOPORCEL

Tabela 21 - Cálculo da área necessária para compostagem com o decorrer do processo.

t (d)	V_{dm} (m ³)	L_{pilha} (m)	A_{base} (m ²)	N°_{filas}		$I_{nec.}$ (m)	$A_{compostagem}$ (m ²)
1	144	24	96	0,5	1	12	600
5	719	120	480	2,4	3	28	1400
10	1439	240	959	4,8	5	44	2200
20	2877	480	1918	9,6	10	84	4200
35	5035	839	3357	16,8	17	140	7000
40	5755	959	3836	19,2	20	164	8200
50	7193	1199	4795	24,0	24	196	9800
60	8632	1439	5755	28,8	29	236	11800
88	12660	2110	8440	42,2	43	348	17400

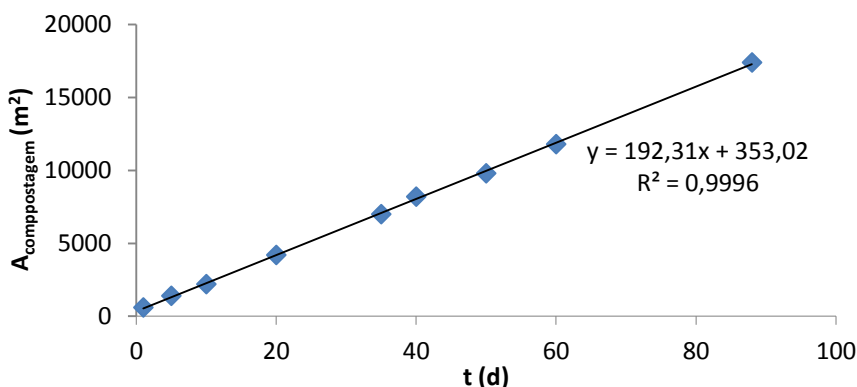


Figura 34 - Evolução da área com o tempo para a unidade fabril da Figueira da Foz.

– UNIDADE FABRIL DE SETÚBAL, PORTUCEL SETÚBAL

Tabela 22 - Cálculo da área necessária para compostagem com o decorrer do processo.

t (d)	V_{dm} (m ³)	L_{pilha} (m)	A_{base} (m ²)	N°_{filas}		$I_{nec.}$ (m)	$A_{compostagem}$ (m ²)
1	335	56	223	1,1	1	12	600
5	1674	279	1116	5,6	6	52	2600
10	3349	558	2232	11,2	12	100	5000
20	6697	1116	4465	22,3	23	188	9400
35	11720	1953	7813	39,1	40	324	16200
40	13394	2232	8929	44,6	45	364	18200
50	16743	2790	11162	55,8	56	452	22600
60	20091	3349	13394	67,0	67	540	27000
88	29467	4911	19645	98,2	99	796	39800

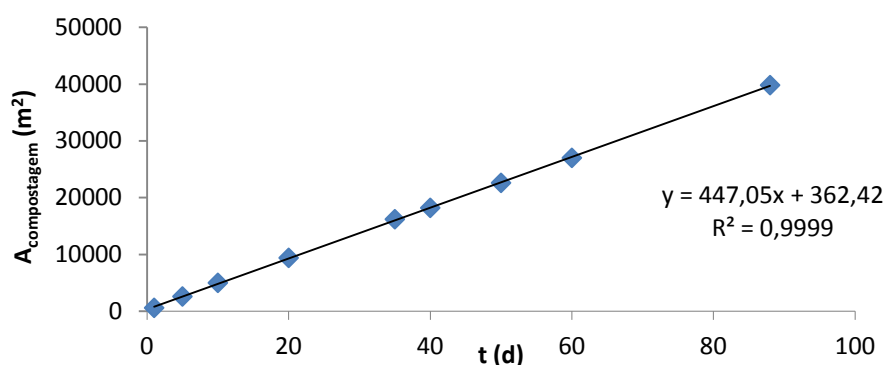


Figura 35 - Evolução da área com o tempo para a unidade fabril de Setúbal.

4.4.2. CÁLCULO DOS CUSTOS NO TEMPO ÓTIMO DE OPERAÇÃO

A estabilização de misturas permite a redução de custos relativos ao transporte para o local de aplicação, espalhamento, incorporação e monitorização da área quando comparado com a aplicação “em fresco”, **Figura 37**, uma vez que reduz a massa a aplicar para uma dose equivalente de nutrientes. No entanto, acarreta custos relativos à disponibilização de espaço e “infraestruturação” do mesmo para se proceder à operação de valorização de resíduos com impactos ambientais controlados (impermeabilização, recolha e tratamento de lixiviados). Deste modo, procedeu-se a uma análise de evolução de custos com o tempo de compostagem que pretende confirmar o tempo ótimo de operação.

A massa seca presente em cada instante, $M_{seca\ presente}$, na pilha, estimada pela **Eq.4**, na **secção 4.2**, conjugada com a informação presente na **Figura 28**, é possível estimar a quantidade de nutrientes, N e P, disponíveis ao longo do processo.

Os custos apresentados na **Figura 37** foram calculados com base na área que o produto estabilizado permite fertilizar, $A_{fert.}$, e com o fator de perda de massa total, f , ao longo do processo de compostagem, **Anexo B**. Esta área é calculada pela **Eq. 16** e representa o potencial fertilizante que o produto tem num determinado momento, **Figura 36**.

$$A_{fert.} \left(\frac{ha}{ano} \right) = \frac{Q_{Ndisp.} (kgN/ano)}{D_{Nrec.} (60kgN/ha)} \quad \text{Eq. 16}$$

Onde a quantidade de N disponível, Q_{ndisp} , é determinada pela evolução da concentração deste parâmetro durante o ensaio de compostagem.

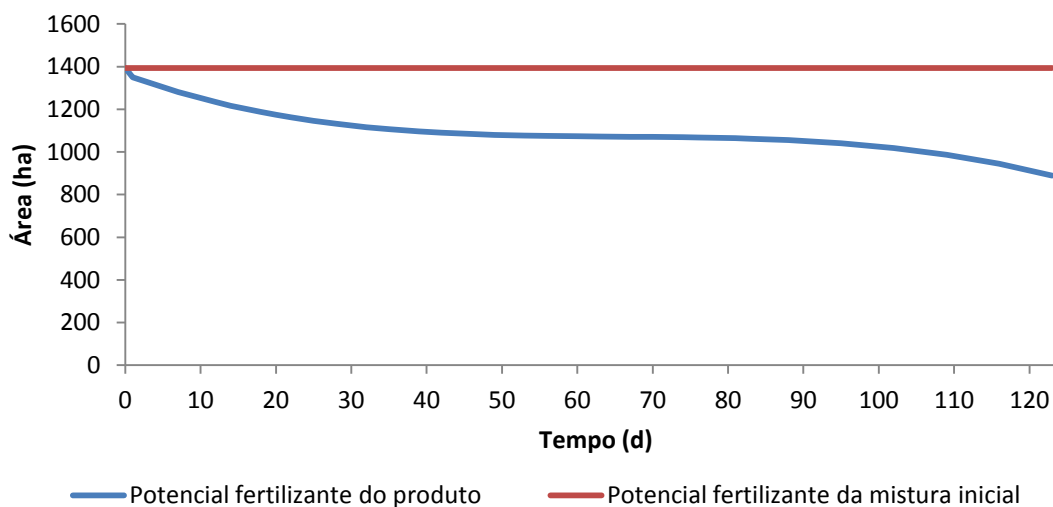


Figura 36 – Potencial fertilizante da mistura de resíduos (Mistura inicial vs produto).

Na base dos cálculos dos diferentes custos operacionais encontram-se os custos unitários descritos na **Tabela 23**.

Tabela 23 - Custos de operação considerados para o cálculo dos custos finais.

Operação	Custo		
	Cacia	Figueira da Foz	Setúbal
Investimento:			
Disponibilização de terreno		20 €/m ²	
Preparação da área		23 €/m ²	
Transporte	0,061 €/tbtq	0,078 €/tbtq	0,061 €/tbtq
- Distância	- 80 km	- 80 Km	- 80 km
Mistura de resíduos	3,0 €/tbtq	2,25 €/tbtq	3,0 €/tbtq
Espalhamento	4,34 €/tbtq	4,34 €/tbtq	3,80 €/tbtq
Incorporação		3,00 €/tbtq	
Monitorização de solos		37,4 €/ha	
Fertilização tradicional		181 €/ha	

- **Custo total**

O **Custo total** é a soma dos restantes custos apresentados: *investimento, mistura, transporte, espalhamento, incorporação, monitorização de solos e fertilização tradicional*.

O cálculo destas parcelas é realizado de acordo com as **equações 17 a 24** e o custo total representa-se na **Figura 37**.

- **Investimento**

Para o cálculo do investimento foi necessário determinar qual o *espaço necessário* para realizar o processo de compostagem, **secção 4.4.1**, e recolher informação sobre o custo desse mesmo espaço, 43 €/m², **Tabela 23**.

$$Inv. \left(\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right) = \frac{A_{compostagem}(\text{m}^2) \times C_{Inv.}(\text{€/m}^2)}{A_{fert.}(\text{ha/ano})} \quad \text{Eq. 17}$$

- **Mistura**

$$Mist. \left(\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right) = \frac{M_{inicial}(\text{tbtq/ano}) \times C_{mist.}(\text{€/tbtq})}{A_{fert.}(\text{ha/ano})} \quad \text{Eq. 18}$$

A massa inicial, $M_{inicial}$, não tem em conta a contribuição do agente de porosidade, casca ou RPM, pois ele é tomado como um agente reutilizável durante todo o processo.

- **Transporte**

$$Transp. \left(\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right) = \frac{M_{presente}(\text{tbtq/ano}) \times C_{transp.}(\text{€/tbtq} \cdot \text{km}) \times Dist.(\text{km})}{A_{fert.}(\text{ha/ano})} \quad \text{Eq. 19}$$

- **Espalhamento**

$$Esp. \left(\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right) = \frac{M_{inicial}(\text{tbtq/ano}) \times C_{esp.}(\text{€/tbtq})}{A_{fert.}(\text{ha/ano})} \quad \text{Eq. 20}$$

- **Incorporação**

$$Incorp. \left(\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right) = \frac{M_{presente}(\text{tbtq/ano}) \times C_{incorp.}(\text{€/tbtq})}{A_{fert.}(\text{ha/ano})} \quad \text{Eq. 21}$$

Onde $M_{presente}$ é a massa de produto num determinado momento e é determinada pela seguinte equação:

$$M_{presente}(\text{tbtq/ano}) = M_{inicial}(\text{tbtq/ano}) \times (1 - f) \quad \text{Eq. 22}$$

- **Monitorização de solos**

O custo de *monitorização de solos* é um custo unitário, 37,4€/ha, tem os seguintes pressupostos:

- 5 €/amostra para recolha

- 88,5 €/amostra para caracterização
- 1 amostra / 5ha
- 2 monitorizações/ciclo

• **Fertilização tradicional**

$$Fert. trad. (\text{€/ha}) = \frac{181(\text{€/ano}) \times A_{fert. trad.}}{A_{fert.}(\text{ha/ano})} \quad \text{Eq. 23}$$

Onde a área que tem de ser fertilizada com fertilizante tradicional, $A_{fert. trad.}$, é dada pela seguinte equação:

$$A_{fert. trad.}(\text{ha/ano}) = A_{fert. max.}(\text{ha/ano}) - A_{fert.}(\text{ha/ano}) \quad \text{Eq. 24}$$

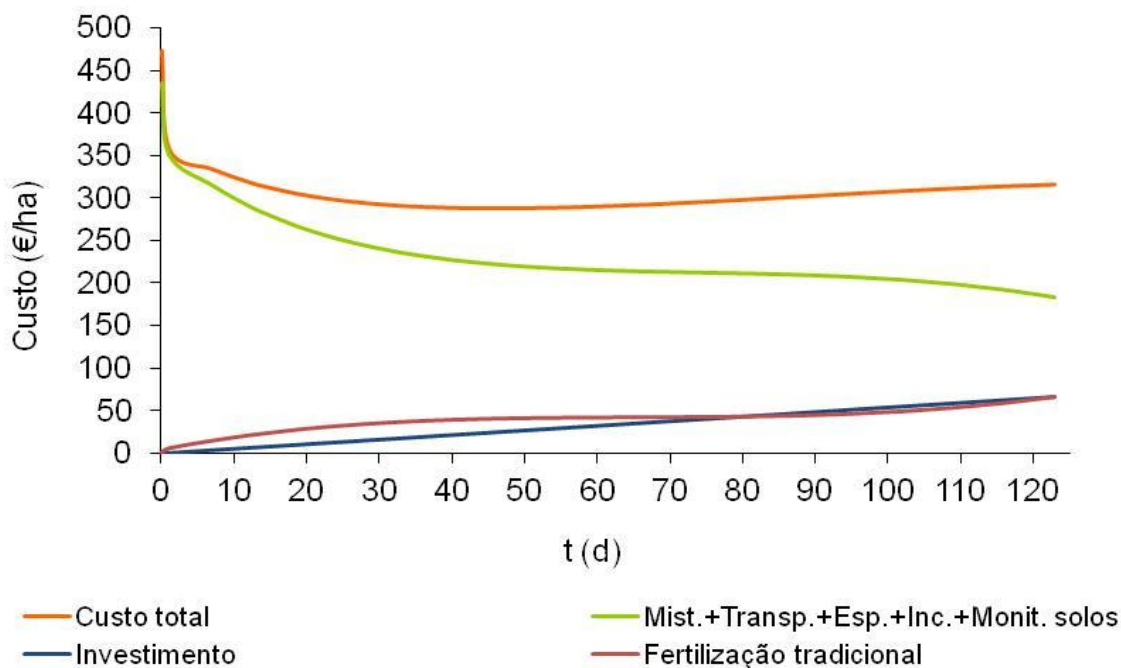


Figura 37 – Variação dos custos inerentes ao processo.

De forma a conhecer qual o momento do processo em que se atinge o mínimo dos custos, recorreu-se a uma derivada de 1ª ordem de acréscimos finitos que indicou um mínimo no 50º de compostagem. A análise indica um tempo ótimo de operação ao fim de 50 dias de compostagem, o que não é igual à escolha feita inicialmente de 35 dias. A avaliação económica do processo, **secção 4.5**, foi realizada com os 35 dias de compostagem uma vez que a mistura de resíduos já apresentava boas características

fertilizantes, candidatas a homologação e que permite reduzir os custos operacionais inerentes ao processo.

O agente de porosidade é um resíduo que poderá ser reutilizado no final do processo, ou seja, poderá ser crivado a cada desmantelamento de uma pilha e ser utilizado na construção da pilha seguinte. Portanto, na análise anterior foi considerado que o agente de porosidade poderá ser reutilizado no final do processo, pelo que os custos são relativos à aplicação das operações à “mistura” de LP, LB e Cz nas quantidades apresentadas na **Tabela 6**. Para que seja possível reutilizar o agente de porosidade é necessário realizarem-se operações de crivagem da mistura final do processo de compostagem, operações essas que não estão contempladas nesta análise. O agente de porosidade não terá de ser necessariamente um dos dois tipos de resíduos testados na primeira fase deste trabalho, a casca ou o RPM. Qualquer outro resíduo com boas características para trabalhar como agente de porosidade e que esteja disponível nas unidades fabris.

4.5. AVALIAÇÃO ECONÓMICA

A aplicação florestal de misturas de resíduos da IPP é já uma técnica de valorização de resíduos praticada pelo gPS, existindo evidências de melhorias da produtividade florestal com a incorporação destes resíduos na própria floresta, o que reduz a necessidade de recorrer a fertilizantes convencionais. Além desta vantagem, a incorporação de resíduos permite que se estabeleça um ciclo entre a aplicação e a floresta, ou seja, ocorre a devolução ao solo dos nutrientes daí retirados durante as colheitas da madeira e casca, garantindo-se a sustentabilidade global desta atividade.

O estudo em questão pretende avaliar a possível instalação de um Parque de Compostagem em cada uma das 3 unidades fabris do gPS e tem como objetivo principal mostrar a eventual viabilidade de tratar e valorizar os resíduos da IPP, através de uma tecnologia de compostagem de baixos custos de investimento.

A avaliação económica também foi realizada para cada unidade fabril do gPS e inclui uma caracterização das unidades fabris, listando-se as necessidades de infraestruturação e equipamentos, um dimensionamento do Parque de Compostagem, uma análise à redução de custos operacionais e uma avaliação do investimento.

4.5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES FABRIS DO GPS

A modalidade de pilha adotada, aquela que apresenta os menores custos inerentes ao processo, é um sistema estático de pilhas de resíduos, dispostas numa área descoberta em cada unidade fabril. Esta modalidade de compostagem baseia-se num processo natural de degradação aeróbia de matéria orgânica, sendo uma solução viável e de fácil execução no tratamento e valorização dos resíduos da IPP, pois não acarreta grandes esforços financeiros e tecnológicos.

O parque de compostagem, de cada unidade fabril, irá ser dividido em três zonas:

1. Zona de receção e mistura dos resíduos fabris;
2. Zona de compostagem, onde as pilhas serão construídas;
3. Zona de crivagem, onde o produto final será afinado, tendo lugar a separação do agente de porosidade para que este possa ser reutilizado.

As necessidades de infraestruturação e equipamentos encontram-se descritas na Tabela:

Tabela 24 – Necessidades de infraestruturação e equipamentos.

Zona	Infraestruturas e/ou equipamentos	Descrição
1	Retroescavadora	Gestão da zona de receção dos resíduos e a sua mistura para posterior construção das pilhas de compostagem
2	Retroescavadora Sonda de temperatura	Construção das pilhas de compostagem Monitorização da temperatura das pilhas
3	Retroescavadora Crivo	Crivagem do composto

A recolha dos resíduos produzidos e que serão estabilizados por compostagem é realizada na própria unidade fabril, pelos mesmos operadores responsáveis pela gestão dos resíduos, com o auxílio de uma retroescavadora e camiões que irão fazer o transporte destes resíduos até ao Parque de Compostagem. A **Tabela 25** apresenta a capacidade destes veículos.

Tabela 25 – Veículos usados no transporte, mistura e construção das pilhas.

Veículo	Volume (m³)	Resíduo a transportar
Camião	15	LP e agente de porosidade
	12	LB
Contentor	3,29	Cz
Retroescavadora	2,3	-

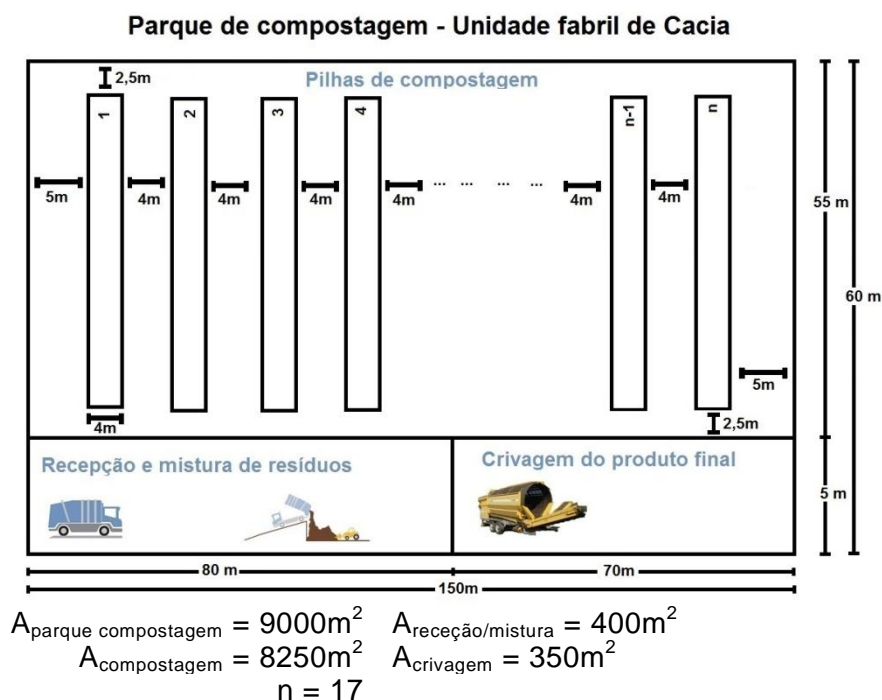
4.5.2. DIMENSIONAMENTO DO PARQUE DE COMPOSTAGEM

O dimensionamento do Parque de Compostagem, teve por base diversos parâmetros que influenciam o seu dimensionamento:

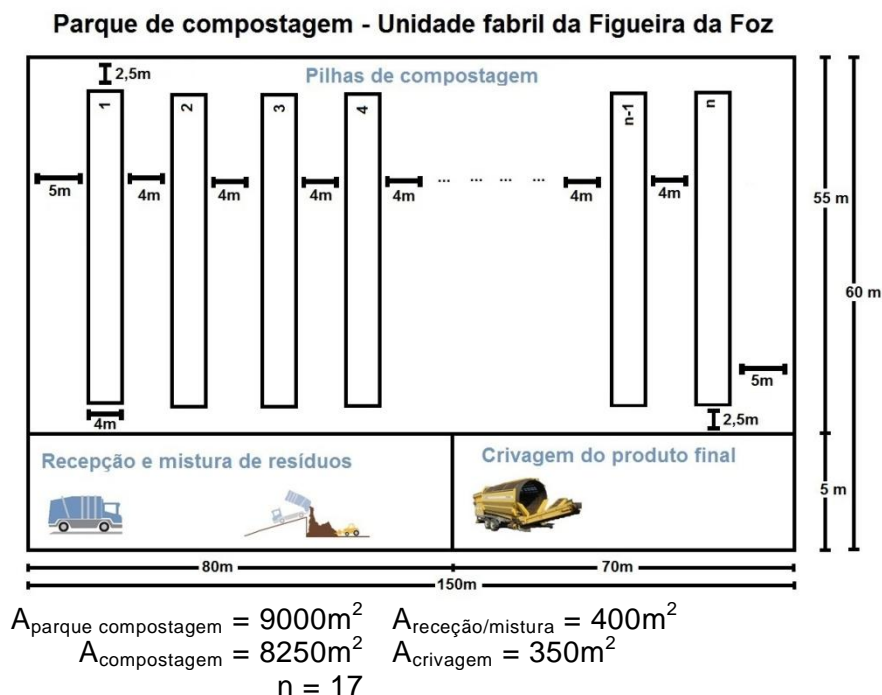
- Quantidade de resíduos produzidos e que serão valorizados por compostagem, **Tabelas 15, 16 e 17**;
- Tempo médio de permanência do material na zona de compostagem (degradação - 35 dias);
- Quantidade de resíduos por pilha: 113 tbtq/dia na unidade fabril de Cacia, 115 tbtq/dia na unidade da Figueira da Foz e 268 tbtq/dia na unidade fabril de Setúbal (estas quantidades incluem o agente de porosidade);
- Dimensão das pilhas de compostagem: 3m de altura, 4 m de largura e 50m de comprimento (4m de espaçamento entre pilhas);
- Quantidade do composto produzido: 18 380 tbtq/ano na unidade fabril de cacia, 18 672 tbtq/ano na unidade fabril da Figueira da Foz e por último 43 474 tbtq/ano para a unidade fabril de Setúbal.

Com base nestes parâmetros é então possível dimensionar, **Anexo C**, as diferentes áreas que irão constituir o Parque de Compostagem de cada unidade fabril, que se esquematiza na **Figura 38**.

a)



b)



c)

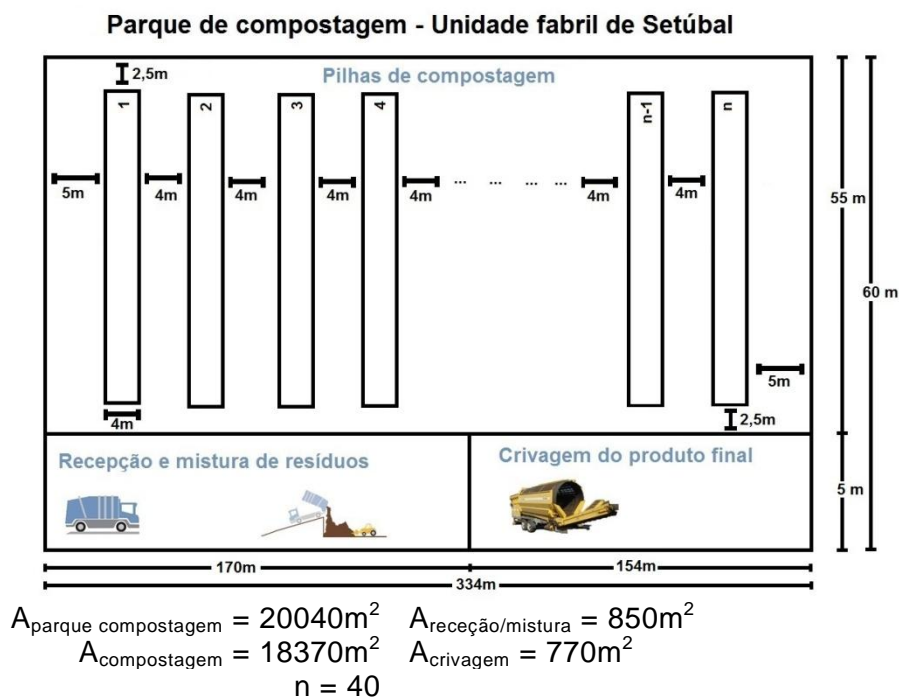


Figura 38 – Plantas do Parque de compostagem das unidades fabris do gPS, Portucel – Cacia **(a)**, Soporcel – Figueira da Foz **(b)**, Portucel – Setúbal **(c)**, em que n representa o número de pilhas construídas ao fim de 35 dias.

4.5.3. CUSTOS OPERACIONAIS

Neste ponto serão avaliados os custos operacionais que irão ser apresentados para as três unidades fabris do gPS, seguindo a mesma linha de análise e os mesmos

pressupostos referidos na **secção 4.4.2**, comparando a opção de encaminhamento e espalhamento em solo florestal dos materiais residuais, em bruto e após estabilização por compostagem. O processo de estabilização da mistura permite a redução de custos operacionais relativos à preparação, transporte, espalhamento e monitorização da aplicação florestal. A redução de custos para os 35 dias de maturação é apresentada nas **Tabela 26, 27 e 28**. Verifica-se que nas três situações existe uma redução dos custos operacionais da ordem dos 30%

Tabela 26 - Redução de custos operacionais, da unidade fabril Portucel Cacia.

Operações	Custos operacionais			
	10 ³ €/ano		€/t _{btq} mistura inicial	
	sem com.	35 dias com.	sem com.	35 dias com.
Mistura	94	94	3	3
Transporte	153	90	4,9	2,89
Espalhamento	135	80	4,34	2,56
Incorporação	94	55	3,00	1,77
Monitorização de solos	51	0	1,64	0
Necessidade adicional fertilizante (Perda de N)	0	51	0	1,64
TOTAL	527	370	16,9	12
Redução de custos operacionais	157		5,0	

A análise considera que o agente de porosidade funciona como agente de porosidade reutilizável.

Tabela 27 - Redução de custos operacionais, da unidade fabril Soporcel.

Operações	Custos operacionais			
	10 ³ €/ano		€/t _{btq} mistura inicial	
	sem com.	35 dias com.	sem com.	35 dias com.
Mistura	71	71	2,25	2,25
Transporte	198	117	6,24	3,67
Espalhamento	138	81	4,34	2,56
Incorporação	95	56	3,00	1,77
Monitorização de solos	52	0	1,64	0
Necessidade adicional fertilizante (Perda de N)	0	52	0	1,64
TOTAL	554	377	17,5	11,9
Redução de custos operacionais	177		5,6	

A análise considera que o agente de porosidade funciona como agente de porosidade reutilizável.

Tabela 28 - Redução de custos operacionais, da unidade fabril Portucel Setúbal.

Operações	Custos operacionais			
	10 ³ €/ano		€/t _{btq} mistura inicial	
	sem com.	35 dias com.	sem com.	35 dias com.
Mistura	222	222	3	3
Transporte	362	213	4,9	2,89
Espalhamento	281	165	3,8	2,24
Incorporação	222	130	3	1,77
Monitorização de solos	121	0	1,64	0
Necessidade adicional fertilizante (Perda de N)	0	121	0	1,64
TOTAL	1207	851	16,3	11,5
Redução de custos operacionais	355		4,8	

A análise considera que o agente de porosidade funciona como agente de porosidade reutilizável.

4.5.4. AVALIAÇÃO DO INVESTIMENTO

O recurso à operação de compostagem implica um investimento relativo à disponibilização e preparação de uma área, na unidade fabril, para o desenvolvimento do processo, custos de construção em aterro (RAIZ, projeto ECOCEL):

- Disponibilização do terreno: 20€/m²;
- Preparação da área: 23€/m²;
- Espaço necessário para o parque de compostagem:
 - 9000 m² na unidade fabril de Cacia
 - 9000 m² na unidade fabril da Figueira da Foz;
 - 20040 m² na unidade fabril de Setúbal.

Poderá existir a necessidade de construção de cobertura em “telha”, 37,6€/m². O trabalho prático desenvolvido não necessitou de cobertura em “telha”, apenas o recurso à manta geotêxtil, cerca de 2,5€/m², permitiu que o processo se desenvolvesse sem qualquer dificuldade. A opção de cobertura caberá a cada unidade fabril tomar a decisão.

A análise descrita anteriormente é análoga às três unidades fabris do gPS.



De modo a avaliar o investimento do processo de compostagem sugerido neste trabalho a **Tabela 29**, apresenta o resultado do *Período de retorno simples*, verificando-se que ele se situa entre 6 a 9 anos, consoante as opções de cobertura.

Tabela 29 – Período de retorno simples nas três unidades fabris do gPS.

	Cacia	Figueira da Foz	Setúbal
Investimento (€)			
Preparação da área	202.887	202.887	451.762
Disponibilização do terreno	180.000	180.000	400.800
Crivo	37.700	37.700	37.700
Total	420.587	420.587	890.262
Total com opção de cobertura (€)			
“Telha”	758.987	758,987	1.643.766
Manta geotêxtil	441.212	441,212	936.187
Redução dos custos operacionais com 35 dias de compostagem (€/ano)	157.000	177.000	355.000
Período de retorno simples (ano)			
Sem cobertura	2,7	2,4	2,5
Com cobertura em “telha”	4,8	4,3	4,6
Com geotêxtil	2,8	2,5	2,6

Da análise da tabela anterior, verifica-se que a gestão dos resíduos da IPP recorrendo ao processo de compostagem testado, permite em aproximadamente em 3 anos recuperar o investimento inicial. A opção de cobertura com geotêxtil aumenta um pouco o período de retorno, mas a opção de cobertura em “telha” é aquela em que este período é o mais longo, cerca de 5 anos.

5. CONCLUSÕES

Em termos de trabalho prático o principal resultado da primeira fase, “*Experiência de compostagem*”, foi o de verificar que ao final de 35 dias de maturação foi possível obter misturas, de resíduos da IPP, estabilizadas com boas características fertilizantes candidatas à homologação pela Portaria nº 1322/2006. A homologação do produto permitirá dispor de uma solução válida e operacionalmente melhorada para a gestão dos resíduos em causa que tem condições para substituir a atual aplicação de resíduos em floresta.

Ao mesmo tempo o produto obtido ainda cumpre as exigências ambientais relativas à aplicação de lamas de tratamento de efluentes, DL nº 276/2009, sendo classificado como Classe 2 e Classe II/IIA, tendo por base o 2nd Draft (DG. Env. A2, 2001) e a Proposta de Norma Técnica Nacional (documento em versão draft), respectivamente. O único parâmetro que impede a sua classificação como classe I (nível mais exigente) é o elemento cádmio.

Relativamente às diferentes modalidades de compostagem, não se identificaram diferenças significativas entre elas, seja entre tipos de arejamento, cobertura ou agente de porosidade. O comportamento entre as seis modalidades testadas foi muito semelhante. Tendo isto em conta, recomenda-se o processo com custos mínimos, pilha estática, sem cobertura e com resíduo da preparação de madeiras, como agente de porosidade. Mas para tal deve-se atender à necessidade de crivagem de grossos com a possibilidade de reutilização do material como agente de porosidade, assim como verificar a necessidade de cobertura em épocas de elevada pluviosidade.

A compostagem como valorização dos resíduos, nas proporções indicadas, permite um escoamento equilibrado, na unidade fabril da Figueira da Foz, dos resíduos produzidos exceto as lamas biológicas, que são utilizadas apenas cerca de metade da quantidade produzida. Nas unidades fabris de Cacia e Setúbal a compostagem permite um bom escoamento dos resíduos, sendo escoadas a totalidade de lamas mistas produzidas e cerca de 1/3 das cinzas.

Em termos de custos operacionais, o processo em estudo permitirá uma redução dos mesmos relativamente à aplicação dos subprodutos originais, estimado em 157 000€/ano (5,0 €/tbtq) para a Unidade Fabril de Cacia, Portucel, em 177 000€/ano (5,6 €/tbtq) no



caso da Unidade Fabril da Figueira da Foz, Soporcel, e em 355 000€/ano (4,8 €/btq) para a Unidade Fabril de Setúbal, Portucel Setúbal.

Estes custos não incluem investimentos em infraestruturação, apenas englobam os custos operacionais de mistura, transporte, espalhamento e incorporação no solo. A avaliação destes custos não foi analisada detalhadamente uma vez que o objetivo principal do estudo do processo de compostagem centrava-se na redução dos custos operacionais da aplicação de misturas de resíduos em solos florestais.

Considerando os custos de investimento em infraestruturas, eles têm um período de retorno entre 3 e 5 anos consoante seja considerado um Parque de Compostagem a descoberto ou com cobertura.

Como conclusão final o estudo efetuado indica que a opção de estabilização por compostagem dos resíduos da IPP, para posterior aplicação em solo florestal é viável e economicamente preferível à opção de aplicação desses resíduos, em fresco, em solo florestal.



BIBLIOGRAFIA

AVNIMELECH Y (1986). - Organic residues in modern agriculture. In The role of organic matter in modern agriculture, pp.1-9. Y. Chen & Y. Avnimelech eds. Martinus Nijhoff, Netherlands.

BELLAMY, K.; CHONG, R.; CLINE (1995) – Paper sludge utilization in agriculture and container nursery culture. *Environmental Quality j.*, **24**:1074-1082

BERTOLDI, M.; CITERNESI, V.; GRISELLI, M. (1982) – Microbial Populations in the Compost process. In: Composting, *The J. G. Press, USA*, 26

BRITO, I. (2005) – Manual de compostagem. Escola Superior Agrária de Ponte de Lima. Instituto Politécnico de Viana do Castelo

BRISSON, I. (1997) – Assessing the waste hierarchy – a social cost-benefit analysis of municipal solid waste management in the European Union, AFK Forlaget, Copenhagen, Denmark

CAMBERATO, J; VANCE, E; SOMESHWAR, A (1997) – Composition and land application of paper manufacturing residuals. *American Chemical Society J.*, 12:185-202

CARDENAS, JR; WANG, L (1980) – Composting process. Handbook of Environmental Engineering; *Human Press*. 269-327

CARTER, N. (1983) - Composting disposes of sludge. Yields byproduct at Glatfelter. *Pulp & Paper J.*, **102- 105**.

CELPA (2006) – Associação da Indústria papeleira. Boletim estatístico 2007

CELPA (2008) – Associação da Indústria papeleira. Boletim estatístico 2008

CELPA (2011) – Associação da Indústria papeleira. Boletim estatístico 2011

[CEPI – Confederation of European Paper Industry \(2006\), Special recycling 2005 statistics, 2006, <http://www.cepi.org>](http://www.cepi.org)

CUNHA-QUEDA, A. (2009) – Valor agrícola e comercial do composto orgânico versus impactes ambientais da sua aplicação. Universidade Técnica de Lisboa. 3º Fórum Nacional de Resíduos. Lisboa

DAY, M.; SHAW, K. (2005) – Processos biológicos, químicos, físicos del compostaje. In: Stollella, P. & Kahn, B. (eds.), Utilización de compost en sistemas de cultivo hortícola. Ediciones Mundi-Prensa, 17-50

Decreto-Lei nº 441/91, 22 de Novembro de 1991

Decreto-Lei nº 184/99, 26 de Maio de 1999

Decreto-Lei nº 190/2004, 17 de Agosto de 2004

Decreto-Lei nº 118/2006, de 21 de Junho de 2006



Decreto-Lei nº 178/2006, 5 de Setembro de 2006

Decreto-Lei nº 173/2008, 26 de agosto de 2008

Decreto-Lei nº 276/2009, 2 de Outubro de 2009

Decreto-Lei nº 73/2011, 17 de Junho de 2011

Diretiva 75/422/CEE, 15 de Julho

Diretiva 86/278/CEE, 12 de Junho

Diretiva 2008/98/CE, 19 Novembro

EPA (2002) – Profile of the pulp and paper industry. Office of Compliance Sector Notebook, United States Environmental Protection Agency

EVANYLO, G.; DANIELS, W.; LI, r. (1999) – Paper mill sludge composting and compost utilization. *Compost Science & Utilization. J.* **7**: 30-39

FEAGLEY, S.; VALDEZ, M.; HUDNALL, W. (1994) – Bleached, primary paper mill sludge effect on bermudagrass on a mine soil. *Soil Scienc Plant Analysese J.*, **157**:389-397

GOLUEKE, C. G. (1991). Understanding the process. In: *Principles of Composting*. Biocycle Journal of Waste Recycling, 14-36

GRAY, K.; SHERMAN, K.; BIDDLESTONE, A. (1971) – a Review of Composting, Part 1 – The practical process. *Process Biochemistry J.*, 32-36

HAUG, R. (1980) – Compost engineering. Principles and practice. *Ann Arbor Science Publishers, Inc.* Pennsylvania, 1-9

HENRY, C.; COLE, D.; HINCKLEY, T.; HARRISON, R. (1993) – The use of municipal and pulp sludge to increase production in forestry. *Sustainable Forestry J.*, **1**:41-56

IPPC (2001) – Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry

KIEHL, E. (1985) – Fertilizantes Organominerais, *Eds Edmar*. CEP 13416-530.189.

KOIVULA, N.; RÄIKKÖNEN, S.; RANTA, J.; HÄNNIEN, K. (2004) – Ash in composting of source-separated catering waste. *Bioresource Technology J.*, **93**:291-299

MACGREGOR, S. (1981) – Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. *Applied Environmental Microbiology J.* 1000-1009

MARCHE, T.; DINEL, H.; SHNITZER, M.; PARÉ, T.; CHAMPAGNE, P.; DESFORGES, J. (2001) – Composting paper mill sludge and hardwood sawdust under optimum conditions. *Biosource technology J.*

NORRIE, J.; GOSSELIN, A. (1996) – Paper sludge amendments for turf grass. *Science Horticulture J.*, **31**:957-960



NURMESNIEMI, H.; PÖYKIÖ, R.; KEISKI, R. L. (2007) – A case study of waste management at the Northern Finnish pulp and paper mill complex of Stora Enso Veitsiluoto Mills. *Waste Management J.*, **27**:1939-1948

PARÉ, T.; DINEL, H.; SCHNITZER, M.; DUMONTET, S. (1998) – Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper. *Biology Fertility Soils J.*, **26**:173-178

PEREIRA NETO, J. (1987) – On the treatment of municipal Refuse and sewage sludge using aerated static pile composting – a low technology approach. PhD Theses The University of Leeds, UK. 376

P. N. Biscaia, A. P. Gomes and J. Labrincha (2011) – Valorization of Poultry litter and paper mill sludge by composting and by production of light weight aggregate. *Wastes: Solutions, Treatments and opportunities*. 1st International Conference, September 12th – 14th.

Portaria nº 15/96, 23 de Janeiro de 1996

Portaria nº 209/2004, 3 Março de 2004

Portaria nº 1023/2006, de 20 de Setembro de 2006

Portaria nº 1322/2006, 24 de Novembro de 2006

RAVIV, M.; TARRE, S.; GELER, Z.; SHELEF, G. (1987) – Changes in some physical and chemical properties of fibrous solids from cow manure and digested cow manure during composting. *Biological Wastes* **19**: 309-318

Regulamento (CE) nº 2003/2003, 13 de Outubro de 2003

REID, I. D. (1998) – Solid residues generation and management at Canadian pulp and paper mills in 1994 and 1995. *Pulp Paper Canada J.* **4**:49-52

ROULEAU, G.; SASSEVILLE, M. (1996) – Waste reduction: a sound business decision. *Pulp and Paper Canada J.* **97**(12), 114-116

RUSSO, M. (2003) – Tratamento de resíduos sólidos. Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

SIKORA, L. (2003) – Compost Age and Sample Storage Effects on Maturity Indicators of Biosolids Compost. *Environ. Qual J.* **30**:2141-2148

STEIN, R.; FISS, E.; WU, J. (1998) – Mills search for new waste disposal methods as landfill policy tightens. *Pulp and Paper J.*, **63**:210-212

SULLIVAN, D.; MILLER, R. (2005) – Propriedades cualitativas, medición y variabilidade de los compost. In: Stollella, P., Kahn, B. 2005. Utilización de compost en sistemas de cultivo hortícola. Ediciones Mundi-Prensa.

SUNTIO, R.; SHIU, W.; MACKAY, D. (1998) – Review of the nature and properties of chemicals present in pulp mill effluents. *Chemosphere J.*, **17**:1249-1290



THOMPSON, G.; SWAIN, J.; KAY, M.; FORSTER, C. (2001) – The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresource Technology J.*, **77**:275-286

TRIPPEPI, R.; GEORGE, M.; CAMPBELL, A. (1994) – Evaluating pulp and paper sludge as a substitute for peat moss in container media. *In: Conference 91st Annual Meeting of the American Society for Horticultural Science*

WICHUK, Kristine M.; Mc CARTNEY, Dary (2010) – Compost stability and maturity evaluation – a literature review. *Published by NRC Research Press, Can. J. Civ. Eng. Vol. 37*

WITTER & LOPEZ-REAL (1987) – The potencial of sewage sludge and composting in a nitrogen recycling strategy for agriculture. *Biol Agric. Hortic.* **5**: 1-23

ZHANG, X.; CAMPBEL, A.; MAHLER, R. (1993) – Newsprint pulp and paper sludge as a soil additive/amendment for alalfa and blue grass: green house study. *Soil and Plant Analysis J.*, **24**:1371-1388

ZUCCONI, F.; BERTOLDI, M. (1987) – Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste, 30-50.



ANEXO A – MÉTODOS ANALÍTICOS

I. Digestão (em água régia)

Material:

- Copos de vidro;
- Balança analítica;
- Provetas de 20mL e 50mL;
- Balões volumétricos de 250mL;
- Funis de vidro;
- Filtros;
- Frascos;
- Manta de aquecimento;
- Suporte para funis de vidro.

1. Lavar os copos com ácido de lavagem e deixar secar;
2. Pesar para cada copo cerca de 2,5 g bs de cada amostra;
3. Colocar em cada copo 25mL de ácido clorídrico (HCl) e 15mL de ácido nítrico (HNO_3);
4. Colocar os copos na manta de aquecimento a 250°C, controlando as digestões com água ultra pura;
5. Terminar as digestões quando no copo está aproximadamente 20mL de amostra.

Enquanto as amostras estão a ser digeridas, preparar o sistema de filtração e frascos para armazenamento:

1. Lavar os frascos com água ultra pura e deixar secar;
2. Colocar no suporte os funis de vidro;
3. Colocar em cada funil um papel de filtro, lavando-os com um pouco de água ultra pura;
4. Por baixo de cada funil colocar os balões volumétricos;
5. Após as amostras digeridas, filtrar as mesmas no sistema montado anteriormente lavando muito bem os copos (perfazer o volume total do balão, 250mL);
6. Transferir o conteúdo dos balões para frascos e armazenar.

II. Eluatos

Material:

- Balões erlenmeyer de 250mL;



- Proveta de 200mL;
- Parafilme;
- Balança analítica;
- Equipamento de agitação;
- Sistema de filtração de vácuo;
- Kitasatos;
- Filtros;
- Frascos.

1. Pesar para cada balão erlenmeyer cerca de 5g bs de cada amostra;
2. Colocar 200mL de água ultra pura em cada um dos balões;
3. Colocar parafilme na boca de cada balão e deixar a agitar durante 24h;
4. Enquanto isto preparar os frascos para armazenamento, lavando-os com água ultra pura e deixar secar;
5. Após 24h, montar o sistema de filtração, lavar os filtros com água ultra pura e filtrar o conteúdo de cada balão;
6. Por fim, guardar os filtrados em frascos e armazenar no frio.

III. Azoto Kjeldahl

Material:

- Balões erlenmeyer de 250mL;
- Balança analítica;
- Balões Kjeldahl de 500mL;
- Provetas de 100mL e 200mL;
- Reguladores de ebulição;
- Aparelho de destilação.

Nota: Fazer duplicados (2 réplicas para cada amostra)

1. Para cada balão de kjeldahl, pesar cerca de 1g de amostra seca, 0,25g de catalisador (HgO – óxido de mercúrio) e 2,5g de sulfato de potássio (K_2SO_4);
2. Colocar nos balão de kjeldahl reguladores de ebulição;
3. Na hote, adicionar 30mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a cada balão e digerir até se obter uma solução límpida (mexer de vez em quando para a amostra não agarrar ao balão);
4. Entretanto, lavar o sistema de destilação com água ultra pura e colocar 50mL de solução indicadora de ácido bórico num erlenmeyer;



5. Após a digestão da amostra, deixar arrefecer os balões à temperatura ambiente e adicionar 200mL de água ultra pura e 100mL da solução de NaOH/ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$;
6. Colocar um balão de kjedahl e o erlenmeyer no sistema de destilação e destilar até se recolher cerca de 100mL;
7. Titular com HCl 0,1 N, sendo o ponto de viragem bem definido (a solução muda de verde para púrpura).

Cálculo:

$$\text{Teor em } N_{kjedahl}(\%) = \frac{(V_2 - V_1) \times 0,01401}{M} \times 100 \quad \text{Eq. A 1}$$

V_1 - Volume de ácido gasto na titulação do ensaio em branco, mL

V_2 - Volume de ácido gasto na titulação da amostra, mL

N_A - Normalidade do ácido usado na titulação da amostra

M - Massa da amostra seca, g

IV. Azoto Amoniacal

Material:

- Copos;
- Balões volumétricos de 50mL;
- Tampas para balões;
- Funis;
- Pipetas de 1mL e 2mL;
- Espectrofotómetro.

1. Fazer previamente os eluatos das amostras;
2. Retirar a cor das amostras:
 - 2.1 Colocar 100mL de amostra num copo e adicionar 1mL de solução de zinco;
 - 2.2 Homogeneizar e acertar o pH para valores de 10,5 (hidróxido de sódio e ácido clorídrico);
 - 2.3 Deixar repousar pelo menos 1 dia, até tudo sedimentar;
 - 2.4 Filtrar (filtros n.º 542) para outros copos.
3. Caso seja necessário, diluir as amostras anteriores;
4. Fazer um branco, colocando num balão 50mL de água ultra pura e 1mL de reagente de Nessler;
5. Para a leitura das amostras, colocar 1mL de reagente de Nessler a cada diluição feita;
6. Espera-se 10mins e lêem-se as absorvâncias a 420nm,



V. Azoto Nítrico

Material:

- Copos;
- Pipetas de 2mL e 10mL;
- Agitador magnético;
- Eléctrodo específico.

1. Caso seja necessário, começar por diluir as amostras em copos com o volume indicado de amostra, água ultra pura até perfazer 10mL e 10mL de solução padrão;
2. Colocar um agitador magnético no copo e agitar durante aproximadamente 1min e ler o potencial (estabilização +/- 1 min).

VI. Azoto Orgânico e Azoto Total

Sabendo que

$$N_{kjedahl} = N_{amoníacal} + N_{orgânico} \quad \text{Eq. A 2}$$

determina-se a partir daqui o Azoto Orgânico:

$$N_{orgânico} = N_{kjedahl} - N_{amoníacal} \quad \text{Eq. A 3}$$

Para o cálculo do Azoto Total:

$$N_{total} = N_{kjedahl} + N_{nítrico} \quad \text{Eq. A 4}$$

VII. Fósforo

Material:

- Balões volumétricos de 50mL;
- Tampas para balões;
- Provetas de 50mL;
- Pipetas de 10mL;
- Espectrofotómetro.

1. Digerir previamente as amostras;
2. Caso seja necessário diluir as amostras diretamente nos balões volumétricos;
3. Fazer um branco, colocando 40mL de água ultra pura e 10mL de reagente de venadato-molibdato;
4. Esperar 10mins e ler as absorvâncias a 400nm (começar sempre pela leitura do branco).



VIII. pH

Material:

- Copos de 250mL;
- Espátula;
- Balança;
- Medidor de pH.

1. Pesar o equivalente a 5g bs de cada amostra para os copos;
2. Colocar água ultra pura até se obter 100g da mistura;
3. Mexer e deixar repousar aproximadamente 15mins;
4. Ler o pH.

IX. Teor Seco e Humidade

Material:

- Copos de 100mL;
- Espátula;
- Balança analítica;
- Estufa.

1. Colocar previamente os copos, durante uma noite, na estufa e no dia seguinte retirar e deixar arrefecer;
2. Pesar todos os copos, M_1 ;
3. Colocar em cada copo +/- 10g de amostra e registar os pesos, M_2 ;
4. Colocar os copos na estufa, 105°C, durante a noite;
5. Retirar os copos da estufa, deixar arrefecer e voltar a pesar, M_3 .

O cálculo do teor seco é dado por:

$$Teor\ seco(\%) = \frac{M_3 - M_2}{M_2 - M_1} \times 100 \quad \text{Eq. A 5}$$

e a humidade por:

$$Humidade(\%) = 100 - Teor\ seco \quad \text{Eq. A 6}$$

X. Matéria Orgânica

Material:

- Cadinhos de porcelana;
- Espátula;
- Balança analítica;



- Estufa;
- Mufla.

1. Calcinar os cadinhos de porcelana na mufla durante 2h-4h, a 550°C, retirar e deixar arrefecer;
2. Pesar todos os cadinhos, M_1 ;
3. Colocar em cada cadinho +/- 10g de amostra e registar os pesos, M_2 ;
4. Colocar os cadinhos na estufa, 105°C, durante a noite;
5. Retirar os cadinhos da estufa, deixar arrefecer e voltar a pesar, M_3 ;
6. Colocar os cadinhos na mufla, a 550°C, durante 4h;
7. Retirar, deixar arrefecer e voltar a pesar, M_4 .

O cálculo da matéria orgânica é dado por:

$$Mo (\%) = 100 - Teor em cinza \quad \text{Eq. A 7}$$

onde o teor em cinzas é dado por:

$$Teor em cinzas(\%) = \frac{M_4 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad \text{Eq. A 8}$$

XI. Teste de Dewar – teste de auto-aquecimento

Material:

- Amostra;
 - Vaso térmico(1,5 – 2L);
 - Termómetro.
1. Colocar a amostra e o termómetro no vaso térmico;
 2. Durante 10 dias registar os diferentes valores de temperatura atingidos ao longo do dia.

Nota: a amostra deve ter um teor de humidade de cerca de 35%.

Para a classificação do composto, utilizar a **Tabela A 1** tendo em conta a temperatura máxima atingida nos 10 dias.



Tabela A 1 - Designação e correspondente classe de estabilidade.

Designação	Temperatura máxima (°C)	Classe de estabilidade
Material inicial	> 60	I
Composto fresco	50-60	II
Composto fresco	40-50	III
Composto maturado	30-40	IV
Composto maturado	< 30	V

Para a interpretação do resultado, recorrer à **Tabela A 2**.

Tabela A 2 - Tabela de interpretação dos resultados do Teste de Dewar.

Acréscimo de T (°C)	Classe de estabilidade	Estabilidade
0-10	V Muito estável	Maturado
10-20	IV Moderadamente estável	
20-30	III Ainda em decomposição	Ativo ou semi-maturado
30-40	II Imaturo ou muito ativo	

Onde o acréscimo de T é obtido pela diferença entre a temperatura máxima registada e a temperatura ambiente.

XII. Granulometria

Material:

- Amostra;
- Balança;
- Crivos (10mm, 4mm, 2mm e 1mm).

1. Pesar a amostra num todo e registar, $P_{inicial}$;
2. Crivar a amostra, utilizando os diferentes e crivos, e pesar a quantidade de amostra retida em cada um e registou-se, a ;
3. Com o peso inicial, $P_{inicial}$, e a soma dos pesos de cada crivo, Σa , determinar o erro da análise:

$$Erro(\%) = \frac{P_{inicial} - \Sigma a}{P_{inicial}} \quad \text{Eq. A 9}$$

4. De igual modo, com o peso inicial, $P_{inicial}$, e com o peso de cada crivo, a , determinar a percentagem correspondente:

$$\% = \frac{a(g)}{P_{inicial}(g)} \quad \text{Eq. A 10}$$

Nota: a amostra utilizada deve ser representativa do composto.



Tabela A 3 - Tabela de registo dos pesos obtidos na crivagem do composto.

Agente de Porosidade	P _{inicial} (g)	Granulometria										Total	Erro
		> 10 mm		> 4 mm		> 2 mm		> 1 mm		< 1 mm			
		g	%	g	%	g	%	g	%	g	%		
Casca		a		a		a		a		a		Σa	
RPM		a		a		a		a		a		Σa	

XIII. Massa Volúmica

Material:

- Copo de 400mL;
- Água;
- Amostra;
- Balança.

1. Fazer uma marca, no copo, nos 400mL;
2. Pesar o copo, P_{copo} ;
3. Encher o copo com amostra, até à marca, e pesar, $P_{\text{copo+amostra}}$;
4. Por fim, retirar a amostra do copo e encher, também até à marca, com água e pesar, $P_{\text{copo+água}}$.

Com os pesos anteriores determinar a massa volúmica do composto, tendo por base a massa volúmica da água (1000 kg/m³):

$$M.V. \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{M_{\text{amostra}}(g)}{M_{\text{água}}(g)} \times M.V. \cdot \text{água} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad \text{Eq. A 11}$$

$$\text{onde } M_{\text{amostra}}(g) = M_{\text{copo+amostra}}(g) - M_{\text{copo}}(g) \quad \text{Eq. A 12}$$

$$\text{e } M_{\text{água}}(g) = M_{\text{copo+água}}(g) - M_{\text{copo}}(g) \quad \text{Eq. A 13}$$



ANEXO B – PERDA DE MASSA

O cálculo da perda de massa, **Tabela B 1**, envolveu os passos descritos na **secção 4.2**.

Tabela B 1 - Perda de massa total.

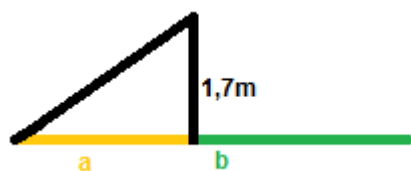
Tempo (dia)	TH _{real} (%)	Mo (%)	Mi (%)	M _{seca} (kg)	TH _{previsto} (%)	M _{seca} prevista (kg)	M _{total} (kg)	Perda massa total (%)
0	64,3	38,32	61,68	100	64	100	280	0%
1					64	96,9	272	3%
7	63,1	29,00		87	61	92,4	239	15%
12	57,2				59	89,4	217	22%
14	57,8				58	88,3	210	25%
18	53,1				56	86,4	197	30%
20	55,9				55	85,6	192	31%
22	54,2				55	84,8	187	33%
25	54,4				54	83,9	181	36%
28	48,4	33,99		93	53	83,0	175	38%
32	55,7				51	82,2	169	40%
35	50,4	21,91		79	50	81,6	165	41%
39	61,1				49	81,1	161	43%
42	51,2				49	80,9	158	44%
46	39,2				48	80,7	155	45%
49	51,7	16,28		74	47	80,6	153	45%
53	42,0				47	80,6	151	46%
56	41,1				46	80,7	150	46%
60	48,8	21,11		78	46	80,8	149	47%
63	41,9				45	81,0	148	47%
67	55,6				45	81,2	147	47%
70	47,0	27,90		86	45	81,3	147	48%
74	44,6				44	81,5	146	48%
76	50,3				44	81,5	146	48%
81	39,8				44	81,6	145	48%
83	38,0				44	81,6	145	48%
88	33,9	24,08		81	43	81,4	144	49%
95	43,4				43	80,8	142	49%
102	39,8				43	79,5	138	51%
109	42,6	18,23		75	42	77,5	134	52%
116	53,5				42	74,6	128	54%

ANEXO C - ÁREAS DO PARQUE DE COMPOSTAGEM

Na **secção 4.5.2**, encontram-se os parâmetros que serviram de base ao dimensionamento dos parques de compostagem e esquemas das plantas do parque com as respectivas áreas.

- Áreas da zona de receção/mistura de resíduos e da zona de crivagem:

No cálculo destas duas áreas, teve-se por base a $A_{compostagem}$ e o maior valor de produção individual dos diferentes resíduos. Além destes pressupostos considerou-se que a mistura de resíduos seria realizada num plano inclinado, com um declive de 5%, a uma altura de 1,7m, conforme se esquematiza:



$$a(m) = \frac{(100 \times 1,7)}{5} \quad \text{Eq. C 1}$$

A pilha de resíduos para mistura teria aproximadamente a forma de um cone com 2,5 m de altura, h :

$$V_{cone}(m^3) = \frac{\pi r^2 h}{3} \quad \text{Eq. C 2}$$

onde V_{cone} será o maior valor de volume individual dos diferentes resíduos.

A **Eq. C 2** determina qual o raio do cone, r , que permitirá ter uma ideia de quanto será o valor da incógnita **b**. Este valor não será o raio do cone mas sim o seu diâmetro, $2r$.

No cálculo final da área de receção/mistura de resíduos estipulou-se uma largura fixa de 5m, $l_{larg.}$, sendo o comprimento dado por:

$$l_{comp.}(m) = a + b \quad \text{Eq. C 3}$$

Sendo por fim, a área da receção/mistura de resíduos calculada pela seguinte equação:

$$A_{receção/mistura}(m^2) = l_{larg.}(m) \times l_{comp.}(m) \quad \text{Eq. C 4}$$

E a área da zona de crivagem por:

$$A_{crivagem}(m^2) = l_{larg.}(m) \times (l_{nec.}(m) - l_{comp.}(m)) \quad \text{Eq. C 5}$$



Nas determinações de qualquer área os valores finais foram aproximados de forma a melhorar/facilitar as contas e representação final dessas mesmas áreas, tendo sido também considerado uma margem de segurança na zona de compostagem (10m no comprimento e 5m na largura) para movimentação dos equipamentos e viaturas.